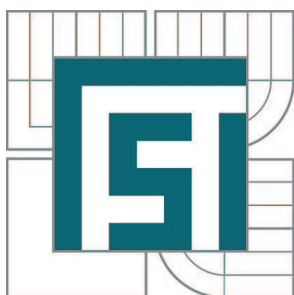


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

ZAŘÍZENÍ PRO OBOHACOVÁNÍ JADERNÉHO PALIVA

EQUIPMENT FOR THE ENRICHMENT OF NUCLEAR FUEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MATĚJ OSTREZI

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LADISLAV SUK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Matěj Ostrezi

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Zařízení pro obohacování jaderného paliva

v anglickém jazyce:

Equipment for the enrichment of nuclear fuel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Seznámení se s problematikou obohacování jaderného paliva. Vypracování rešerše shrnující metody obohacování. Vypracovat základní ekonomickou rozvahu náročnosti obohacování.

Cíle bakalářské práce:

1. Popište historii obohacování jaderného materiálu.
2. Popište metody obohacování.
3. Proveďte ekonomickou rozvahu náročnosti obohacování.

Seznam odborné literatury:

Štamberg, K.: Technologie jaderných paliv I, ČVUT, 1996

Databáze technických článků ScienceDirect.

Databáze publikací World Nuclear Association.

Databáze publikací International Atomic Energy Agency.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Suk

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 21.11.2013

L.S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je shrnout poznatky o možnostech a důvodech obohacování jaderného paliva. Popsat jednotlivé způsoby obohacování se zaměřením na jejich historii, princip funkce, energetické a technologické nároky a účinnosti jednotlivých metod. Poukázat na značnou náročnost procesu a provést ekonomickou rozvahu jednotlivých metod.

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to review the current knowledge and possibilities dealing with an enrichment of the nuclear fuel and to describe particular methods of the enrichment. An attention is paid to basic principles, functions, technological and power requirements and efficiency of the discussed methods. In conclusion, a difficulty of the enrichment process is pointed out and a balance sheet of the economic impact is made.

Klíčová slova

Uran, jaderné palivo, obohacování uranu, separace izotopů, elektromagnetická separace, plynná difuze, centrifugy, AVLIS, MLIS, ekonomika obohacování uranu, SWU

Key words

Uranium, nuclear fuel, uranium enrichment, isotope separation, electromagnetic separation, gaseous diffusion, centrifuge, AVLIS, MLIS, economics of uranium enrichment, SWU

Bibliografická citace

OSTREZI, M. Zařízení pro obohacování jaderného paliva. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 85 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Suk.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Zařízení pro obohacování jaderného paliva“, vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum:
25.05.2014

Jméno a příjmení:
Matěj Ostrezi

Podpis:

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Ladislavu Sukovi za připomínky, konzultace a vedení této práce, přátelům a rodině za podporu.

Obsah

1	Úvod.....	11
1.1	Historie.....	11
1.1.1	Objev izotopů.....	11
1.2	Objev štěpení.....	11
1.2.1	Nutnost obohacování	13
2	Obecné informace.....	16
2.1	Materiály používané v separačních procesech	16
2.1.1	Uran	16
2.1.2	Hexafluorid uranový (UF ₆)	16
2.1.3	Tetrachlorid uraničitý (UCl ₄).....	17
2.1.4	Uranová plazma.....	17
2.2	Separační poměr.....	18
2.3	Separační práce	18
2.4	Separační výkon	19
2.5	Kaskády	20
3	Elektromagnetická hmotnostní separace.....	23
3.1	Historie.....	23
3.2	Princip.....	23
3.3	Ekonomická rozvaha.....	25
4	Separace tepelnou difuzí.....	27
4.1	Historie.....	27
4.2	Princip.....	27
4.3	Ekonomická rozvaha.....	29
5	Separace plynnou difuzí	30
5.1	Historie.....	30
5.2	Princip.....	30
5.3	Ekonomická rozvaha.....	33
6	Centrifugální separace.....	34
6.1	Historie.....	34
6.2	Princip.....	34
6.3	Ekonomická rozvaha.....	42
7	Aerodynamická separace	43
7.1	Historie.....	43
7.2	Princip.....	43
7.3	Ekonomická rozvaha.....	46
8	Pokročilé metody separace.....	47
8.1	Separace excitací atomových par laserem (AVLIS – Atomic vapor laser isotope separation).....	47
8.1.1	Historie.....	47
8.1.2	Princip.....	47
8.1.3	Ekonomická rozvaha.....	50
8.2	Separace laserovou excitací molekul (MLIS – Molecule laser isotope separation).....	50
8.2.1	Historie.....	50
8.2.2	Princip.....	50
8.2.3	Ekonomická rozvaha.....	53

8.3	Porovnání problémů metody AVLIS a MLIS.....	53
8.4	Separace plasmy rezonancí v cyklotronu	54
8.4.1	Historie	54
8.4.2	Princip	54
8.4.3	Ekonomická rozvaha	56
8.5	Chemická separace CHEMEX.....	57
8.5.1	Historie	57
8.5.2	Princip	57
8.5.3	Ekonomická rozvaha	58
8.6	Chemická separace ASAHI	58
8.6.1	Historie	58
8.6.2	Princip	58
8.6.3	Ekonomická rozvaha	60
9	Celková ekonomická rozvaha	61
10	Závěr	68
11	Použitá literatura	69
12	Seznam použitých symbolů.....	72
13	Přílohy	73

1 Úvod

Elektrická energie se stala již pro většinu populace naprostou samozřejmostí, ale její výroba se s nadále zvyšující poptávkou stává problematická. Nynější trendy pálení fosilních paliv pro výrobu elektrické energie se s ubývajícím zásobou stanou cenově nevýhodné a ekonomicky neudržitelné. Použití obnovitelných zdrojů v tak velkém měřítku je velmi problematické, v některých geografických oblastech doslova nemožné.

Jedním, velmi pravděpodobným, řešením je použití jaderných reaktorů, které mají potenciál nahradit využívání fosilních paliv. Nové generace reaktorů mají dostatečné výkony i účinnosti a s efektivnějším vyhořením paliva by se z nich mohly v budoucnu stát preferované zdroje energie. U starších generací je dnes možné zvyšovat výkon i bezpečnost modernizací systémů. Právě bezpečnost jaderných reaktorů je nyní velmi rozebírána, po nehodě v japonské Fukushima Daiichi některé země opustily jadernou energetiku úplně.

Pokud dojde v budoucnu k rozšíření využití jaderné energie, bude nutno řešit i zvětšení poptávky paliva. Tato práce je zaměřená právě na způsoby obohacování paliva a jejich ekonomické a technologické nároky.

1.1 Historie

Historie jaderných paliv a jejich obohacování je spjata s mnoha objevy, které umožnily uvolnit energii atomu pro použití lidstvem. Dnes používané jaderné paliva jsou v nějaké formě tvořena především uranem, bohužel jen některé izotopy uranu jsou použitelné pro efektní výrobu elektrické energie.

1.1.1 Objev izotopů

Izotopy jsou nuklidy jednoho prvku se stejným počtem protonů i elektronů, ale rozdílným počtem neutronů. Jejich existence byla předpovězena v roce 1910 Henri Becquerelem, při jeho výzkumu radioaktivity a Frederickem Soddy, který pozoroval atomy rozdílných atomových hmotností a stejných chemických vlastností, což bylo v té době těžko vysvětlitelné. Potvrzení přišlo o několik let později použitím hmotnostních spektrografů, které dokázaly rozdělit ionizované izotopy prvku pomocí magnetického pole na základě rozdílných atomových hmotností v důsledku různých počtů neutronů. Hmotnost není jediná vlastnost, kterou mají izotopy odlišné, byla pozorována i mírná odlišnost chemických vlastností.

Rozdíly způsobené různým počtem neutronů ve velké míře ovlivňují štěpitelnost atomového jádra. Například uran má 23 pozorovaných izotopů, většina byla jen experimentálně vytvořena v laboratoři, v přírodě se vyskytují pouze izotopy ^{233}U , ^{235}U a ^{238}U , z nichž se nyní jen ^{235}U používá jako primární štěpné palivo v jaderných reaktorech.

1.2 Objev štěpení

Štěpení bylo objeveno v roce 1938 Němci Ottem Hahnem, Fritzem Strassmannem a Lisou Meitnerovou, kteří bombardovali uran urychlenými neutrony a zjistili vznik dvou lehčích prvků, tedy štěpných produktů a několika neutronů. Potvrdila se tedy možnost štěpní a cesta k atomové energii byla otevřena. S uranem se v těch dobách velmi často experimentovalo, je to

nejtěžší přírodní prvek vyskytující se na zemi s 92 protony a navíc s nezvykle vysokým počtem neutronů. ^{235}U má 143 neutronů, ^{238}U dokonce 146.

Po tomto objevu v tehdy nacistickém Německu se pokusy rychle rozeběhly i v USA, kvůli obavě z využití energie jádra jako zbraně v tehdy probíhající druhé světové válce.

Štěpitelné izotopy

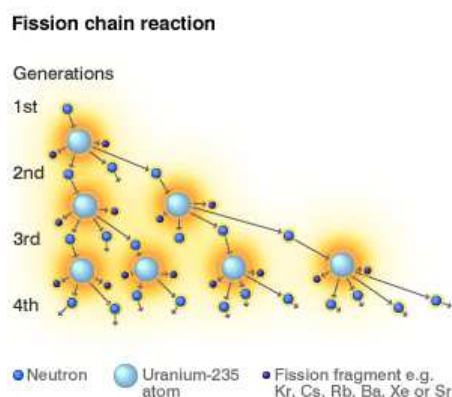
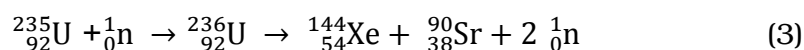
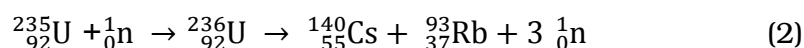
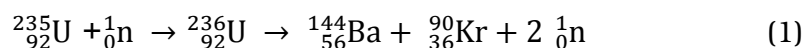
Již dříve bylo zjištěno, že se uran skládá z několika izotopů. Po experimentech a bombardování uranových vzorků proudem neutronů z urychlovače vědci zjistili, že některé izotopy lze štěpit snadněji, než jiné.

Když vědci podrobili neutronovému bombardování malý vzorek ^{235}U , získaný z dopadové plochy hmotnostního spektrografu, dosáhli mnohem většího množství štěpných reakcí, nežli při bombardování přírodní směsi izotopů uranu. Naopak při bombardování ^{238}U se jim nepovedlo dosáhnout téměř žádného štěpení.

Řetězová reakce

Již po prvních experimentech, bylo zřejmé, že při štěpení uranu vznikají dva produkty štěpení a několik neutronů. Součet neutronů uranu a neutronu, který vyvolal štěpení, se podle základních přírodních zákonů musel rovnat součtu neutronů v atomech, které štěpením vznikly. Bylo ale zjištěno, že tato rovnice neplatí a musí se při štěpení uvolňovat volné neutrony, které by teoreticky mohly vyvolat další štěpné reakce. Byla tedy položena teorie řetězové štěpné reakce, která by mohla být zdrojem velkého množství energie.

Podle velkého množství prvků vznikajících při štěpné reakci se zjistilo, že může probíhat velkým množstvím různých způsobů. Nejčastěji ale štěpná reakce probíhala podle těchto rovnic:

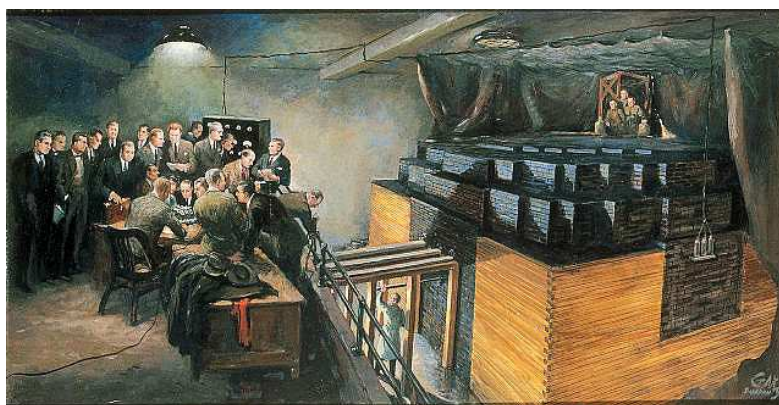


Obr. 1 Řetězová reakce [6]

Chicago Pile-1

Teoreticky byla tedy řetězová štěpná reakce možná, k praktickému potvrzení bylo rozhodnuto postavit experimentální reaktor pod vedením Enrica Fermi v Chicagu pod nepoužívaným fotbalovým hřištěm. Jako palivo sloužil přírodní uran vkládaný do grafitových cihel, které byly poskládané uvnitř dřevěného bednění. Grafit sloužil jako moderátor, jako kontrolní a regulační prvky byly použity tyče z kadmia a india. Reaktor dosáhl kritického stavu 2. Prosince 1942 v 15,25 a byla tedy experimentálně potvrzena možnost udržitelné řetězové štěpné reakce.

Avšak tento testovací reaktor měřil asi 7,5 metrů na délku a šířku a 6 metrů na výšku. Vevnitř byly naskládány grafitové cihly o celkové váze 350t, přičemž v určitých cihlách byly umístěny uranové bloky, aby vytvářely sférickou oblast koncentrace uranu. Celkově bylo použito 36,5t oxidu uranu a 5,5t čistého přírodního uranu (v obou formách byl uran neobohacen), aby bylo dosaženo kritické hmotnosti a udržitelné řetězové reakce.



Obr. 2 Reaktor Chicago pile-1 [17]

1.2.1 Nutnost obohacování

Jelikož byly hmotnostní a rozměrové vlastnosti prvního reaktoru nepoužitelné pro vojenské i energetické využití, jedinou možností tedy bylo separovat štěpitelný izotop ^{235}U a postavit reaktor z obohaceného uranu s větším podílem izotopu ^{235}U . Větší koncentrace izotopu ^{235}U by dovolila zmenšit kritickou hmotnost a následně i celkovou velikost reaktoru, vyskytla se tedy potřeba obohacování uranu pro potřeby širšího využití.

Izotop ^{235}U je v uranu zastoupen asi v 0,718%, v nepatrné složce 0,004 % je zastoupen nevyužívaný izotop ^{234}U a zbytek tvoří termálními neutrony neštěpitelný izotop ^{238}U .

Separace izotopů je komplikovaný a náročný proces, který využívá nepatrné rozdíly ve vlastnostech obou izotopů, zejména malý rozdíl v atomové hmotnosti. Hmotnostní poměr atomu ^{235}U a ^{238}U je 0,98739, ^{235}U je o 1,2609% lehčí, než ^{238}U , tedy asi o $5 \cdot 10^{-27}$ kg. V procesu separace se ale nepoužívá čistý uran, ale jeho sloučeniny, například UF_6 pro difuzní a centrifugální procesy a UCl_4 pro elektromagnetickou separaci. V těchto sloučeninách je hmotnostní rozdíl molekul izotopů uranu ještě menší. Kromě menšího diferenciálu hmotností sloučenin izotopů je například UF_6 poměrně nebezpečnou látkou.

UF_6 je v plynné formě velmi toxický, prudce reaguje s vodou a pro většinu kovů je velmi korozivním prostředím. Je ale používán, protože je velmi těžce nahraditelný, sloučeniny jiného chemického složení nejde použít, protože nevyhovují fyzikálními vlastnostmi, nebo se prvky vyskytují ve více stabilních

izotopech a to by velmi ztížilo separační proces. Termodynamické podmínky (teploty a tlaky tání, varu) splňuje ještě například U_6 , ale tato sloučenina snižuje poměrný hmotnostní rozdíl izotopických molekul, protože jód má větší relativní atomovou hmotnost, než flór. Což by vedlo k nižším separačním poměrům a výkonům.

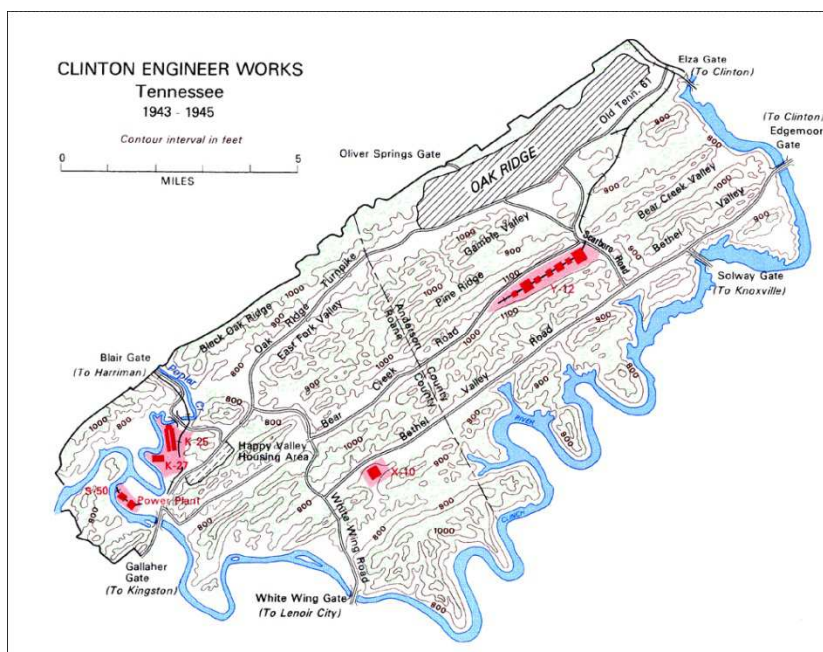
Teoreticky jednodušší chemická separace je v procesu separace izotopů velmi složitá. Byla pozorována nepatrně odlišná tendence izotopů upřednostňovat jiné oxidační stupně u jednotlivých izotopů [25]. Chemické separace jsou v procesu výzkumu a vývoje například ve Francii, nebo Japonsku, ve větší míře jsou tyto metody rozebrány v kapitolách 8.5 a 8.6.

Projekt Manhattan

Byl snažení armády spojených států amerických o vývoj atomové bomby a právě zde došlo k prvnímu obohacování uranu na průmyslové úrovni. Zájem o atomový výzkum se zvýšil po vstupu USA do 2. světové války, na konci roku 1941, v prosinci roku 1942 byla potvrzena možnost řetězové štěpné reakce a objevila se možnost konstrukce zbraně využívající energii štěpení s obrovským potenciálem. Mimo konstrukční problém této bomby bylo hlavní překážkou i palivo řetězové reakce, kterým v případě bomby musel být uran obohacený na velmi vysokou úroveň, tedy více jak 90%.

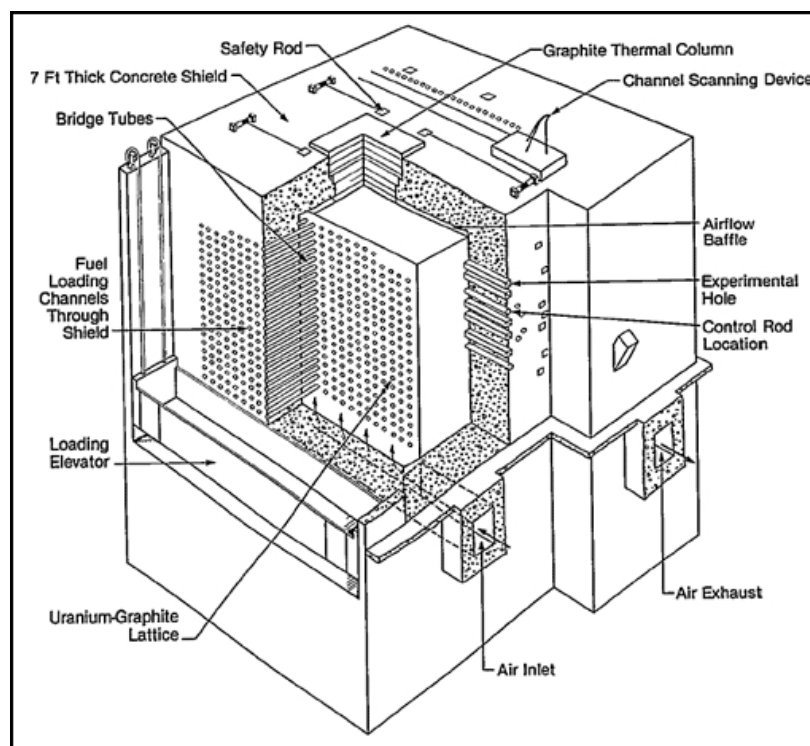
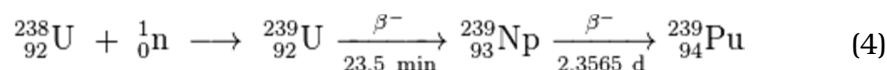
Obohacení uranu z klasické koncentrace 0,7% na více jak 90% ^{235}U si vyžádalo obrovské zdroje pracovní síly, peněz, surovin a nových technologií. Jako místo pro obohacovací operace bylo zvoleno odlehlé místo v Oak Ridge, Tennessee. Celkově byla použita plocha asi 182km^2 a v rozmezí let 1942 až 1945 bylo v tomto projektu na obohacování uranu použito několik metod separace uranu:

- Elektromagnetická hmotnostní separace (Y-12)
- Plynná difuze (K-25)
- Tepelně-kapalinná difuze (S50)



Obr. 3 Mapa Oak Ridge [27]

V projektu Manhattan byl použit také vzduchem chlazený reaktor (X-10), zkonstruován pro nepřetržitou výrobu plutonia. Jako palivo sloužil přírodní uran, uložený ve válcových schránkách a vkládán do aktivní zóny tvořenou blokem grafitu přibližně tvaru krychle o stěně 7,4m s kanálky pro uranové bloky (Příloha obr. 1). V reaktoru probíhala řetězová štěpná reakce ^{235}U a jako vedlejší produkt z ^{238}U vznikala ^{239}Pu dle reakce popsané rovnicí (4). Plutonium bylo poté chemicky separováno z uranových bloků. ^{239}Pu je štěpitelný neutrony ve větším rozmezí energií než ^{235}U . Je možné ho štěpit jak termálními neutrony s energií 0,025eV tak i rychlými neutrony s energií 1-20MeV. Nepotřebuje tudíž moderaci neutronů pro udržení řetězové reakce jako například ^{235}U . ^{239}Pu je v dnešní době používáno například jako palivo v množivých reaktorech, nebo výrobu atomových zbraní.



Obr. 4 Schéma reaktoru X-10 [27]

2 Obecné informace

2.1 Materiály používané v separačních procesech

Uran se používá v separačních procesech v několika formách, mezi nejvýznamnější patří čistý uran, uran ve formě plasmy, hexafluorid uranový (UF_6) a tetrachlorid uraničitý (UCl_4). Každá z forem má své unikátní vlastnosti, kterých se při separačních procesech využívá.

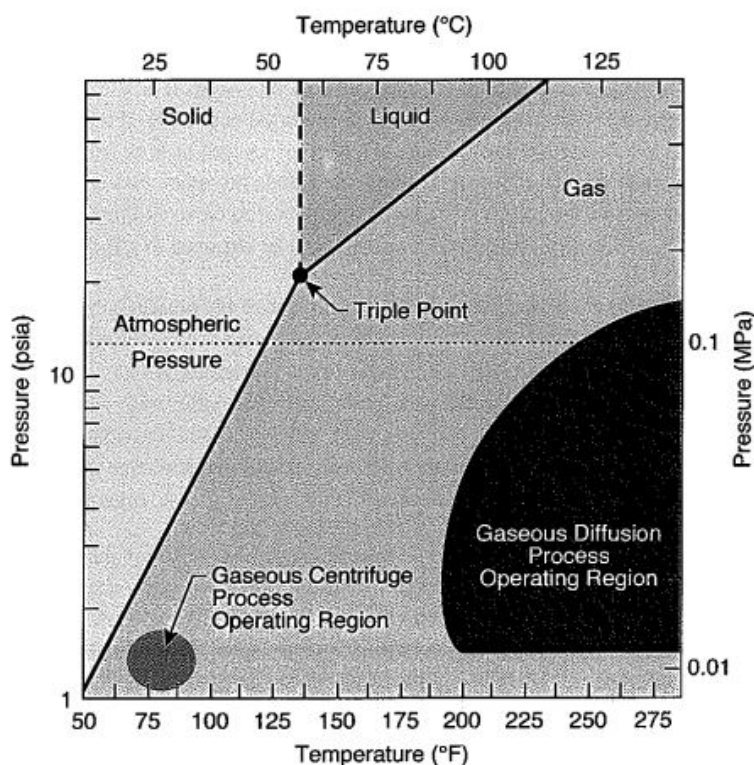
2.1.1 Uran

Uran v čisté formě je stříbrný kov poměrně velké hustoty. Používá se pouze v separačním procesu AVLIS (kapitola číslo 8.1). Je méně radioaktivní, jelikož všechny jeho izotopy jsou nestabilní a rozpadají se alpha přeměnou, produkty tohoto rozpadu jsou také nestabilní a dále se rozpadají alpha, nebo beta přeměnou. Alpha i beta záření jde při separačních procesech velmi lehce odstínit. Mnohem větším problémem při obohacování je jeho velká toxicita a korozivita.

Z používaných sloučenin má čistý uran největší poměrnou hmotnostní diferenci mezi izotopy ^{235}U a ^{238}U – 1,26%.

2.1.2 Hexafluorid uranový (UF_6)

Je sloučenina tvořená atomem uranu, který je obklopen šesti atomy fluoru. Za pokojové teploty je to bílý krystalický prášek s velkou měrnou hmotností. Používá se v separačních procesech plynné a tepelné difuze, v centrifugální separační metodě a metodě MLIS v plynném stavu. Jednotlivé operační tlaky a teploty jsou naznačeny v P-T diagramu UF_6 v Obr. 5.



Obr. 5 P-T diagram UF_6 [25]

Při skladování a převážení je UF_6 v specializovaných normalizovaných sudech v pevném, nebo kapalném stavu.

Tab. 1 Typy přepravních sudů [17]

Typ	30B	48X	48Y	45G	1S	2S
Materiál	Ocel	Ocel	Ocel	Ocel	Nikl	Nikl
Max. míra obohacení [%]	5	4,5	4,5	1	100	100
Průměr [cm]	76,2	121,9	121,9	121,9	3,8	8,9
Délka [cm]	205,7	307,3	381	370,8	27,9	29,2
Tloušťka stěny [cm]	1,27	1,59	1,59	0,79	0,16	0,28
Hmotnost nádoby [kg]	635	2041	2359	1179	0,79	1,91
Maximální hmotnost UF_6 [kg]	2277	9539	12501	12701	0,45	2,22
Celková hmotnost [kg]	2912	11580	14860	13880	1,25	4,13

UF_6 tvoří jednoduché molekuly a je tedy jednoduchý k výrobě ve velmi čistém stavu bez kontaminace jinou látkou. Velkou nevýhodou této sloučeniny je velká reaktivita, korozivita a toxicita. Radioaktivita je jako u čistého uranu zanedbatelným bezpečnostním rizikem s ohledem na ostatní vlastnosti této sloučeniny.

Reagovat může s velkým množstvím látek, asi nejvíce nebezpečná je její reakce s vodou i ve formě vzdušné vlhkosti za vzniku kyseliny fluorovodíkové.

Je velmi korozivním prostředím, což vede k používání drahých kovů a slitin při obohacovacím procesu jako je nikl, zinek a měď.

I přes velké množství záporných vlastností je jednou z nejpoužívanějších forem uranu v obohacovacích procesech. Fluor má jediný stabilní izotop a tak je plyn tvořen pouze molekulami s izotopy uranu – $^{235}\text{UF}_6$ a $^{238}\text{UF}_6$. Poměrná hmotnostní difference lehčí molekuly k těžší molekule je o něco menší, než u čistého uranu – 0,85%.

2.1.3 Tetrachlorid uraničitý (UCl_4)

Je tmavě zelená sůl, její molekuly jsou tvořeny atomem uranu a čtyřmi atomy chlóru, používaná pouze v elektromagnetické separaci, která se v dnešní době na průmyslovém měřítku obohacování uranu již nepoužívá. Za pokojové teploty a tlaku se jedná o látku v pevném stavu, která je chemicky stabilní. Za vysokého vakua při cca 500°C sublimuje a jako plyn je poté v calutronu ionizována a jsou separovány jednotlivé izotopy $^{235}\text{UCl}_4$ a $^{238}\text{UCl}_4$. UCl_4 není zdaleka tak korozivní jako UF_6 , ale ponechává si nebezpečnou toxicitu. Jeho radioaktivita není bezpečnostním rizikem z důvodu lehkého stínění alpha a beta záření.

2.1.4 Uranová plazma

Používaná v procesu separace plasmy rezonancí a jiných metodách využívajících uran ve formě plazmy Vlastnosti plazmy se v zásadě neliší od vlastností čistého uranu popisovaného v kapitole číslo 2.1.1. Jediným problémem metod využívající uranovou plasmu je nutnost tepelné izolace, jelikož její teplota při separačním procesu může dosáhnout až 75 000 K.

2.2 Separační poměr

Je poměr procentuálního obohacení obohaceného a vstupujícího uranu.

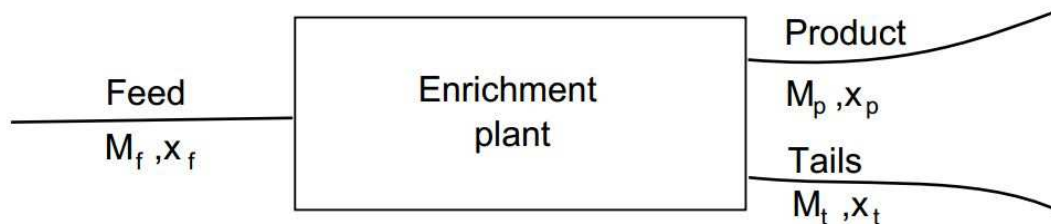
$$\alpha = \frac{N_a}{N_b} \quad (5)$$

N_a molární zlomek $^{235}\text{UF}_6$ ve směsi $^{235}\text{UF}_6$ a $^{238}\text{UF}_6$ po separaci
 N_b molární zlomek $^{235}\text{UF}_6$ ve směsi $^{235}\text{UF}_6$ a $^{238}\text{UF}_6$ před separací

Separační poměr nemá vliv na výkon stroje, například elektromagnetická separace dosahuje separačního poměru až 30 (dokáže obohatit uran z přírodní koncentrace 0,7% jedním průchodem až na 10-15%). Protože ale umožňuje jen velmi malé průtoky materiálu, tak se dnes již téměř nepoužívá. Plyná difuze například dosahuje separačního poměru asi 1,002, ale obrovské průtoky ji učinily výhodnou a ve velkém měřítku se používala. V dnešní době je vytlačována méně energeticky náročnou centrifugální separací.

2.3 Separační práce

Je skutečný ukazatel výkonu jednotlivých metod, zahrnuje separační poměr i průtoky materiálu a další množství faktorů.



Obr. 6 Schéma obohacovacího procesu [18]

Obohacovací proces jde popsat rovnicemi:

$$m_f = m_p + m_t \quad (6)$$

$$x_f m_f = x_p m_p + x_t m_t \quad (7)$$

$$m_f = \left(\frac{x_p - x_t}{x_f - x_t} \right) m_p \quad (8)$$

m_p	Hmotnost obohaceného výstupu [kg]
x_p	Obohacení výchozího uranu [-]
m_t	Hmotnost ochuzeného výstupu [kg]
x_t	Obohacení ochuzeného výstupu [-]
m_f	Hmotnost vstupního materiálu [kg]
x_f	Obohacení vstupního materiálu [-]

Po úpravě rovnice lze vypočítat kolik bude potřeba vstupního uranu, při daném ochuzení odpadního produktu pro produkci daného množství uranu s daným stupněm obohacení.

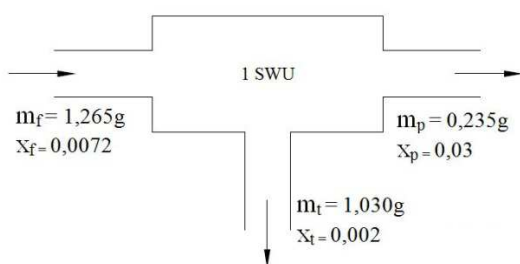
Jelikož podle zákonů termodynamiky musí být při tomto procesu dodávána energie, byla zavedena jednotka SWU (separative work unit), která je ukazatelem dodané práce a je dána rovnicemi (9). Které berou v potaz koncentraci ^{235}U ve vstupním materiálu (x_f), výstupním obohaceném materiálu (x_p) a výstupním ochuzeném materiálu (x_t):

Pro x_p , x_f , x_t je dáno:

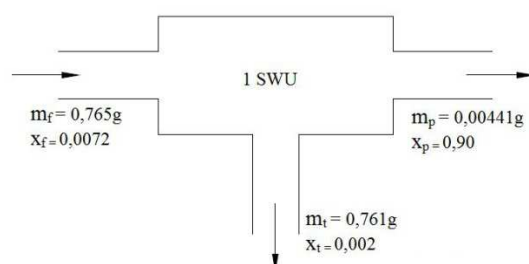
$$V(x) = (1 - 2x) \ln \left(\frac{1-x}{x} \right) \quad (9)$$

Poté jsou rovnice pro x_f , x_t a x_p použity v rovnici (10) spolu s hmotností vstupního materiálu m_f , hmotností ochuzeného produktu m_t a hmotností obohaceného produktu m_p . Množství SWU pro obohacení určitého množství uranu na požadovanou úroveň obohaceného produktu a s určitou koncentrací ^{235}U v ochuzeném výstupu platí rovnice (10):

$$SWU = m_p V(x_p) + m_t V(x_t) - m_f V(x_f) \quad (10)$$



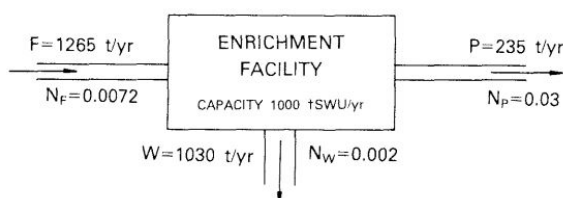
Obr. 7 Příklad obohacování uranu pomocí 1 SWU na 3% obohacení [18]



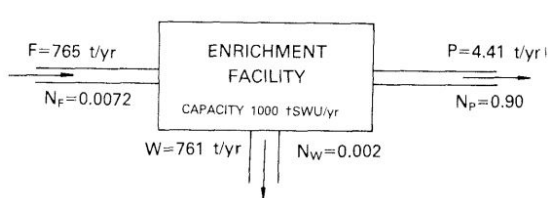
Obr. 8 Příklad obohacování uranu pomocí 1 SWU na 90% obohacení [18]

2.4 Separační výkon

Popisuje schopnost separačního zařízení, nebo komplexu, dodávat separační práci za jednotku času. Užívají se jednotky například SWU/rok, kSWU/rok, tSWU/rok nebo MSWU/rok. Přičemž platí převody $1 \text{ MSWU/rok} = 10^3 \text{ kSWU/rok} = 10^3 \text{ tSWU/rok} = 10^6 \text{ SWU/rok}$. [32]



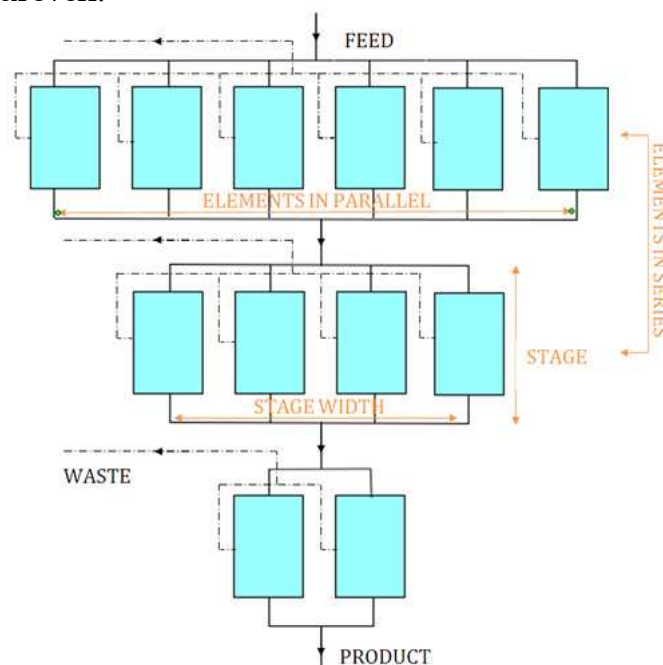
Obr. 9 Obohacování pomocí 1000 tSWU/rok na 3% obohacení [18]



Obr. 10 Obohacování pomocí 1000 tSWU/rok na 90% obohacení [18]

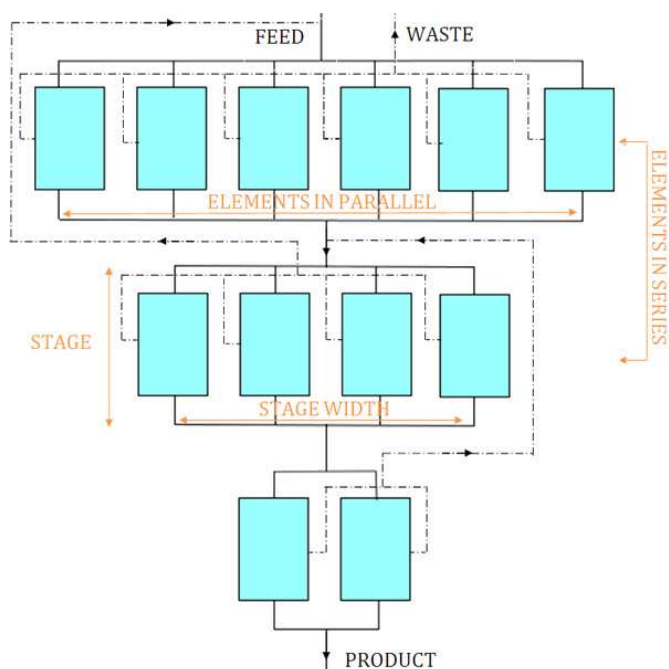
2.5 Kaskády

Při použití separačních metod s velmi malým obohacovacím potenciálem, jako tepelná difuze, plynná difuze, centrifugální separace, aerodynamické metody, nebo MLIS je nutností výsledek jednoho procesu použít jako vstupní materiál pro následující proces, tímto lze materiál obohatit na požadovanou úroveň.



Obr. 11 Schéma jednoduché kaskády [28]

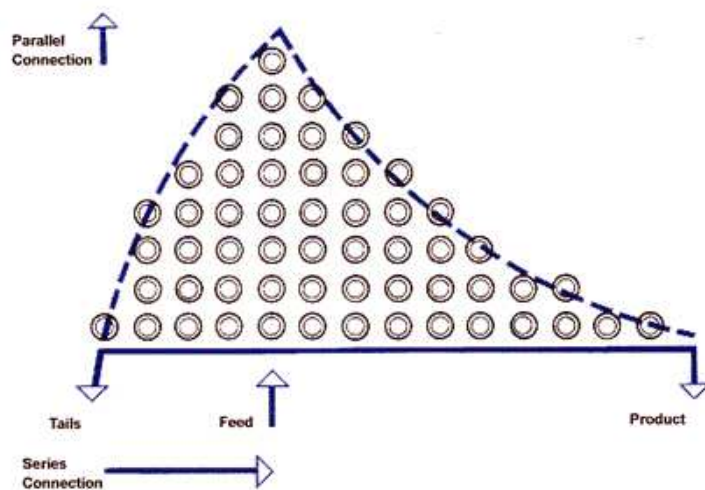
Schematicky naznačená kaskáda se skládá ze za sebou jdoucích (v sérii) fází, přičemž každá fáze se skládá z určitého počtu vedle sebe (paralelních) separačních prvků (například kolona pro tepelně-kapalinnou difúzi, separátor pro plynnou difuzi, nebo centrifuga). Do všech strojů v jedné fázi vstupuje forma uranu se stejnou úrovní obohacení, jeho cestu ve schématu znázorňuje plná čára. V separátorech se vstupní materiál dělí separačním procesem na ochuzenou větev, značena čerchovanou čarou, a obohacenou větev, ve schématu plnou čarou. Teoreticky je výstupní materiál ze separátorů v jedné fázi totožný, ale v praxi mohou nastat mírné rozdíly v průtoku, nebo obohacení materiálu. Všechny výstupy ze strojů ve fázi jsou sjednoceny a použity jako vstup do další fáze.



Obr. 12 Schéma kaskády s recyklací ochuzených proudů [28]

Ochuzený materiál vycházející ze separátorů ve vyšší fázi (vstupním materiálem je již obohacená forma uranu) obsahuje pořád velké množství izotopů ^{235}U . Čím je vyšší fáze, tím je i ochuzený výstup obohacen na vyšší úroveň a bylo by nevýhodné se jej zbavovat. Proto se přidává do vstupu též fáze a podstoupí separační proces znovu, nebo vstupuje do nižší fáze, jak je naznačeno na schématu v Obr. 12.

Počet strojů v jednotlivých fázích závisí na separačním faktoru jednotlivých strojů a na koncentraci ^{235}U ve výsledném produktu a ochuzeném odpadním uranu. Obohacení výsledného produktu záleží na jeho použití, pro energetické reaktory 2-5%, pro výzkumné reaktory 20-60% a pro použití ve zbraních a vojenských reaktorech až 90% a více. Zbytkové množství ^{235}U v ochuzeném UF_6 (Tail) je otázkou ekonomiky obohacovacího zařízení. Se snižujícím se obohacením ochuzeného materiálu se zvyšují náklady na obohacování a snižuje se množství vstupního materiálu (Feed) při stejném množství výstupního produktu. Naopak s velkým zbytkovým obsahem ^{235}U v ochuzeném materiálu se snižuje potřebná práce na obohacení, ale zvyšuje se množství potřebného vstupního materiálu. Obsah ^{235}U v ochuzeném uranu se pohybuje v rozmezí 0,25-0,35%, záleží na ekonomické situaci a firmě. Celkový počet strojů v kaskádě se pohybuje řádově až ve stovkách, nebo tisících kusech.



Obr. 13 Schéma znázorňující počet strojů v kaskádě [9]

3 Elektromagnetická hmotnostní separace

3.1 Historie

Zařízení pro separaci izotopů pomocí magnetického pole se nazývají calutrony (složenina z Cal – California, U – uran, tron – cyklotron). Poprvé postaveny v laboratořích univerzity Berkeley v Kalifornii Ernestem Lawrencem, nositelem Nobelovy ceny za fyziku, kterou obdržel za svůj vývoj cyklotronu. První použití v roce 1939 bylo za účelem získání malého vzorku izotopu ^{235}U pro laboratorní pokusy, na začátku roku 1942 byla demonstrována možnost použití v průmyslovém rozsahu a v 1943 byly calutrony použity v projektu Manhattan v Oak Ridge, Tennessee pod označením Y-12.

Byly použity dva typy strojů, s označením α a β , každé s mírně jinou konstrukcí a jiným obohacovacím poměrem.

Calutrony α používaly jako vstupní materiál přírodní uran s koncentrací ^{235}U asi 0,7% a obohacovaly jej na 10-15%. Tento materiál se používal jako vstupní pro calutrony β , které byly na výstupu schopny produkovat vysoce obohacený uran zbraňové kvality s asi 90% ^{235}U .

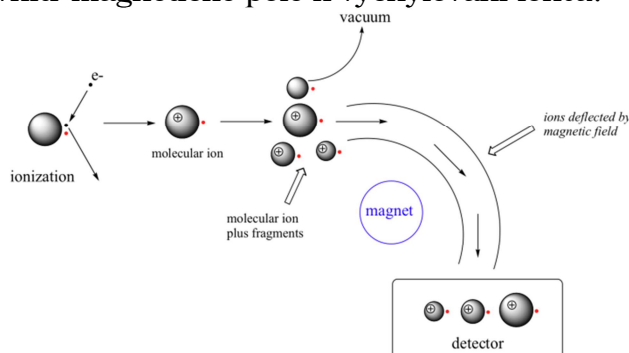
V srpnu roku 1945 byl projekt Y-12 ukončen, protože již byl obohacen dostatek uranu na použití v bombě používající uran a veškeré budoucí snažení bylo věnováno bombě využívající plutonium.

V dnešní době je v provozu několik calutronů, které se používají na separaci stabilních izotopů jiných prvků, zejména kalcia, nebo jódu, pro použití v medicíně Příloha obr. 7.

3.2 Princip

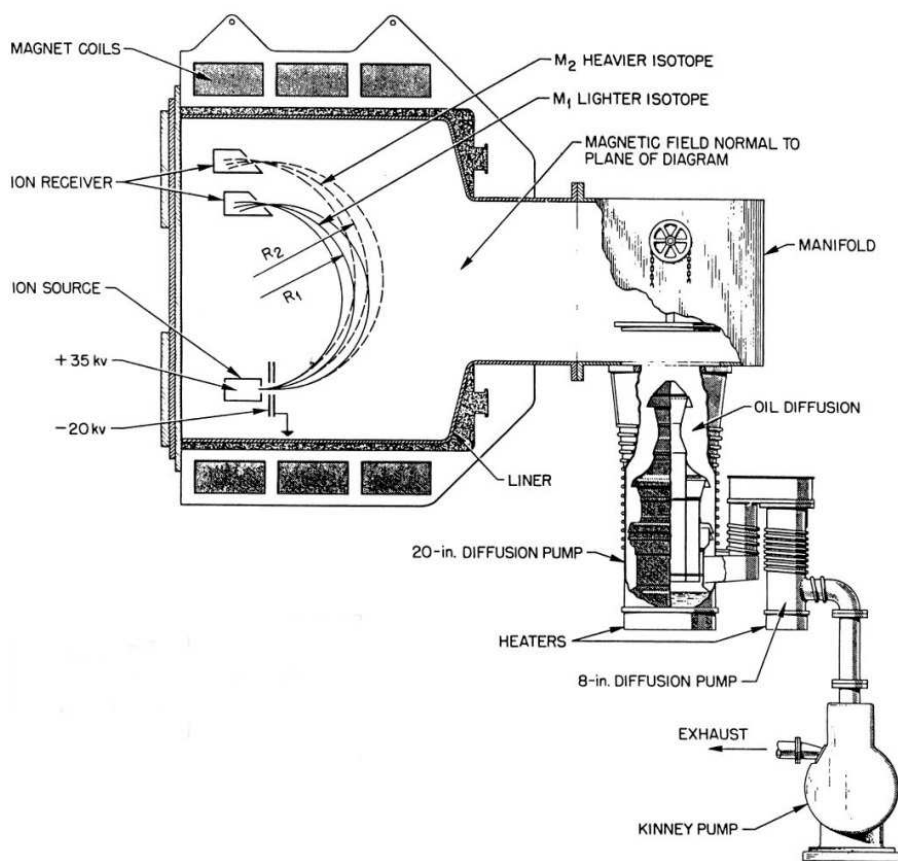
Calutrony fungují na principu, jako hmotnostní spektrometry. Vzorek o neznámém složení se ionizuje a urychlí směrem do magnetického pole, které ovlivňuje dráhu jednotlivých iontů a stáčí jejich trajektorie do kružnice o poloměru závislé na hmotnosti jednotlivého iontu. Takto jde zjistit složení vzorku, nebo s dostatečně výkonným spektrometrem separovat izotopy jednotlivých prvků. Hmotnostní spektrometry jsou používány zejména v laboratořích při experimentech, zato calutrony jsou konstruovány pro dlouhodobý provoz a separaci izotopů jediného prvku.

Calutrony v Oak Ridge byly asi 4m dlouhé, 4m vysoké a 1m široké zařízení s hermetickou komorou, ve které vakuové pumpy udržovaly tlak do 10Pa. V této komoře se nacházely zásobníky materiálu, zařízení na ionizaci, urychlovače a kolektory. Zařízení bylo obaleno velmi silnými elektromagnety, které vytvářely uvnitř magnetické pole k vychylování iontů.



Obr. 14 Princip spektrometru [6]

V případě calutronů α a β byla vstupním materiálem sůl uranu UCl_4 . Nosiče s 100g UCl_4 byly poté odporově ohřívány a sůl se odpařovala rychlostí 1-4g/h, páry byly urychlovány a ionizovány pomocí dvou vyhříváných vláken z tantalu s průměrem 4mm *Příloha obr. 3*. Ty byly udržovány na asi 50kV nižším potenciálu, než zdroj, což vedlo k urychlení proudů ionizovaných molekul uranové soli. V důsledku silného magnetického pole tvořeného elektromagnety se trajektorie proudu stáčely do tvaru kružnice a dopadaly do sběrných komor vyplněných grafitem. Proud lehčích iontů $^{235}\text{UCl}_4$ se pohyboval po trajektorii s menším poloměrem, než těžší ionty $^{238}\text{UCl}_4$. Po použití několika nosičů s UCl_4 se celý calutron rozebral, grafit i s usazenou solí izotopů se spálil a z popela se poté vybral čistý kovový uran *Příloha obr. 4*. Z jednoho kolektoru ochuzený, z druhého kolektoru obohacený. UCl_4 se ale bohužel velmi špatně ionizuje a proto nebylo asi 90% odpařeného materiálu nijak elektricky nabito a usadilo se na vnitřních stěnách komory, ty musely být pravidelně čistěny a zbytkový materiál znovu použit. Zvláště u β calutronů, kde byl vstupní uran v soli obohacen už na 10-15%.



Obr. 15 Schéma calutronu [6]

Proces v calutronu je lehce fyzikálně popsitelný:

$$\frac{1}{2}mv^2 = qU_u \quad (11)$$

$$\frac{mv^2}{r} = qB \quad (12)$$

Tab. 2 Parametry calutronů alpha a beta [6]

Typ calutronu	r [m]	B [T]	2Δr [m]	U _u [kV]	P [kW]	U [V]	I [A]
Alpha	1,22	0,32	0,156	35	4500	600	7500
Beta	0,61	0,64	0,078	35	4500	600	7500

m	hmotnost iontu [kg]
v _i	rychlost iontu [ms ⁻¹]
q	náboj iontu [C]
U _u	urychlovací napětí [kV]
r _c	poloměr kruhové trajektorie [m]
B	intenzita magnetického pole [T]
U	Napětí elektromagnetu [V]
I	Proud procházející elektromagnetem [A]
P	Výkon elektromagnetu [kW]

3.3 Ekonomická rozvaha

Velké energetické nároky na provoz elektromagnetů a malé hodinové průtoky materiálu nejsou pro průmyslové využití ideální. Tato metoda byla ale masově použita v letech 1942-1945 pro absenci jiných obohacovacích metod. Celkově bylo použito 864 calutronů typu alpha a 216 calutronů beta s celkovým instalovaným příkonem elektromagnetů 4860MW [5]. Pracovaly 24 hodin denně, sedm dní v týdnu a na vrcholu obohacovacího snažení byly schopny obohatit až 200g uranu denně na úroveň 90% pro použití v atomové zbraní. Kromě velké energetické náročnosti je jeden z velkých záporů této metody malá schopnost ionizace soli UCl₄, při hodinovém průtoku materiálu 1-4g/h a skutečnosti, že 90% se usazovalo na stěnách komory, je množství obohaceného materiálu minimální. Pro zefektivnění procesu byly v pozdějších letech provozu Y-12 do jednoho calutronů vkládáno větší množství zdrojů iontů, některé beta calutrony měly tak až čtyři zdroje a množství protékajícího materiálu se tak zčtyřnásobilo. Tento problém by šel odstranit použitím uranu v jiné sloučenině, jelikož se calutrony k separaci po roce 1945 používaly jen minimálně, další výzkum se v tomto směru neprováděl. V dnešní době se používají pro separaci stabilních izotopů jiných prvků a v minimální míře se jej snažili použít v Iránu na obohacování uranu pro jejich účely.

Kromě velké energetické spotřeby a malé efektivity obohacovacího procesu se objevily i některé konstrukční problémy. Jako jeden z největších problémů bylo použití velkého množství velmi silných elektromagnetů v budově postavené z železobetonu a ocelových výztuh. Aby bylo zabráněno porušení struktury budovy, nebyly elektromagnety provozovány na maximálním výkonu *Příloha obr. 2*. Dalším z problémů byla konstrukce samotných elektromagnetů, měď potřebná na vinutí elektromagnetů byla během válečného snažení potřeba pro armádu. Na vinutí bylo tedy použito

dalšího velmi dobrého vodiče elektrického proudu, kterého měly v té době spojené státy americké dostatek, stříbra *Příloha obr. 5*. Celkem bylo na tento projekt půjčeno z banky USA asi 15 000 t stříbra, které bylo použito na vinutí elektromagnetů většinu alpha calutronů a asi v polovině beta calutronů.[6]

Energetická náročnost procesu je odhadována na 3000-4000 kWh/SWU.[20]

4 Separace tepelnou difuzí

4.1 Historie

Princip tepelné difuze byl navržen teoretickými fyziky Davidem Enskogem v 1911 a Sydney Chapmanem 1916, experimentálně poprvé ověřena v roce 1917. Poprvé mimo laboratoř byla separační metoda použita v Německu roku 1938 na separaci izotopů neonu, Klaus Clusius a Gerhard Dickel umístili do středu vertikální trubky odporový drát, který poté elektrickým proudem ohřívali. Byli ale limitováni velmi malým tepelným výkonem žhavicího drátu. Řešení objevili v USA vědci Arthur Bramley a A. Keith Brewer. Ti použili dvě soustředné vertikální trubky, přičemž vnitřní trubku ohřívali párou a vnější trubka byla z vnější strany chlazená vodou. Materiál k separaci byl vháněn do prostoru mezi vnější a vnitřní trubkou.

Poprvé bylo této separační metody na obohacování uranu použito v USA v roce 1942 ve výzkumném oddělení námořnictva spojených států amerických. Začali totiž vyvíjet reaktor pro potřebu pohonu ponorek, čímž by odstranili jejich palivové požadavky a ve válce by získali zásadní výhodu.

Testovací provoz se rozeběhl 15. listopadu 1942 s použitím pěti 11m vysokých kolon. Po rozšíření bylo použito osmnácti kolon, které běžely bez přestávky 1000 dní a mírně obohatili 107kg uranu.

Protože se testovací provozem dařilo obohacovat menší množství uranu, bylo rozhodnuto začít obohacovat uran ve větším měřítku. Jako místo pro další snažení byly vybrány loděnice ve Filadelfii, zvláště kvůli velkým turbínovým laboratořím a kotelnám, které mohly produkovat dostatek páry pro separační proces. 1. ledna 1944 začala stavba jedné kaskády o 102 kolonách s výškou 15m. Plánovaný výkon této kaskády bylo 100g uranu obohaceného na 6% denně, nebo 10kg obohaceného na 0,95% denně [7]. Záleželo na zapojení kaskády, princip kaskády vysvětlen v kapitole 2.5.

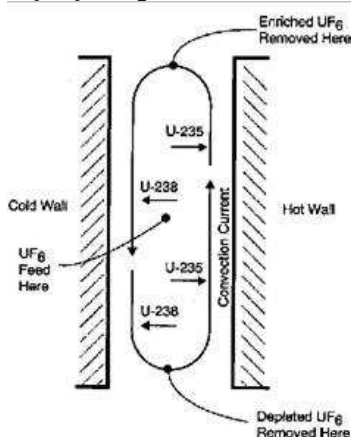
V této době se již rozeběhl obohacovací proces v Oak Ridge a vedení projektu Manhattan se rozhodlo použít i tepelně difúzní separační metodu ve velkém rozsahu. Stavba komplexu S-50 začala 26. června 1944, a 30. září bylo plánován ostrý provoz. Hlavní budova byla 160m dlouhá, 25m široká a 23 metrů vysoká, tedy dost velká pro umístění 2142 kolon, 18m vysokých *Příloha obr. 8*. Byla také vybudována kotelna, která dodávala páru pro separační proces. Celkový plánovaný obohacovací výkon zařízení měl být 1kg denně vysoce obohaceného uranu na 90%, tohoto výkonu se ale nepodařilo ani zdaleka dosáhnout.

Všechny zařízení pro tepelnou difúzi byly odstaveny několik dní po ukončení druhé světové války a v dnešní době se již nepoužívají.

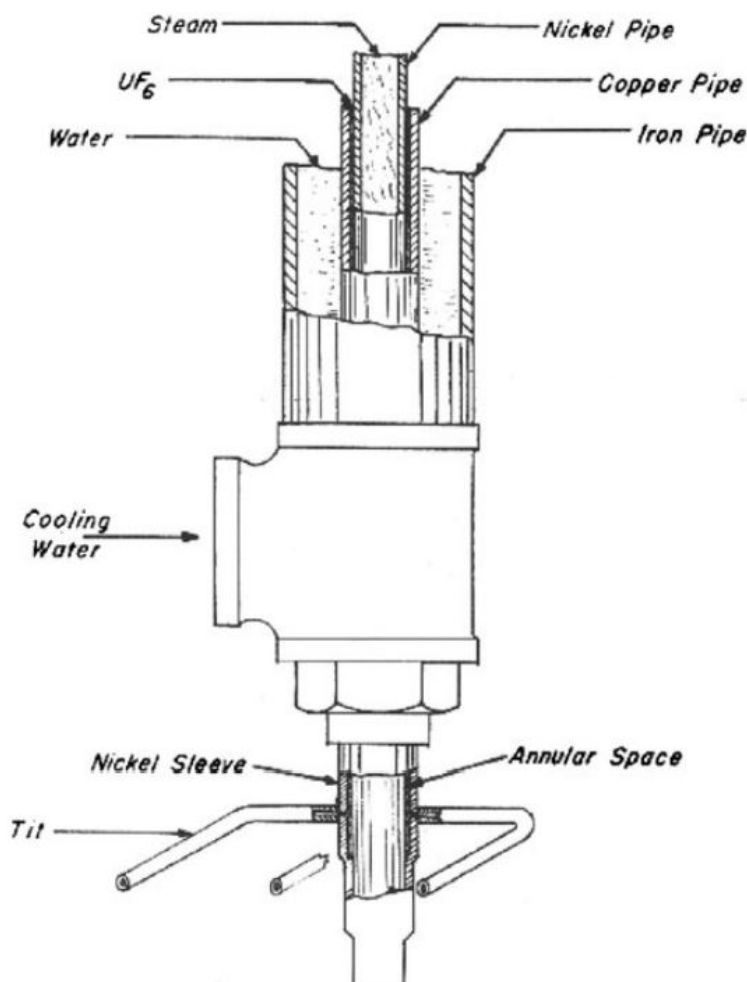
4.2 Princip

Pokud je směs dvou izotopů vystavena tepelnému gradientu, mají lehčí izotopy tendenci přibližovat se teplé oblasti a těžké izotopy mají tendenci opačnou, tedy se přibližovat ke studené oblasti. Tohoto principu je využito u separace izotopů pomocí tepelné difuze. Ve čtyřicátých letech dvacátého století se objevil koncept koaxiálních (souosých) trubek, kde vnitřní je ohřívána uvnitř proudícím médiem, v mezitrubkovém prostoru je separovaný materiál a vnější povrch větší trubky je chlazen. Tím vzniká velký tepelný gradient a lehčí izotopy ^{235}U jsou koncentrovány u horkého povrchu a těžší izotopy ^{238}U se

shromažďují u studeného povrchu. Současně jsou izotopy ^{235}U ohřívány a konvekci stoupají směrem vzhůru do horní části kolony, odkud jsou odčerpávány a je tak vytvořen mírně obohacený tok, ze spodní části je materiál také odčerpáván a tvoří ochuzený výstup.



Obr. 16 Princip tepelné difuze [7]



Obr. 17 Schéma kolony v projektu K-25 [7]

Niklové a měděné trubky (Obr. 17) byly používány z nutnosti předejití styku UF_6 s ocelí, ta by velmi rychle korodovala a z důvodu většího tlaku v koloně, než je atmosférický by hrozilo uvolnění UF_6 do prostoru budovy. Nikl byl jediný materiál, který dokázal odolávat korozi při vysoké teplotě, proto byl

použít na vnitřní trubku. Na vnější chladnou trubku již nebyly tyto podmínky kladeny a byla použita měď.

Velikost mezery, ve které se UF_6 nacházel má obrovský dopad na rychlost separace, experimentovalo se s několika možnostmi – 0,65mm, 0,53mm, 0,38mm, 0,20mm a 0,14mm. Největší obohacovací schopnost měla mezera 0,14mm, ale kvůli velmi omezenému průtoku bylo na projektu S-50 zvolena mezera 0,25mm.

Jedním z konstrukčních problémů byly právě již zmíněné měděné a niklové trubky, kromě nedostatku těchto kovů ve válečné ekonomice, musely být trubky vyrobeny s velmi přísnými rozměrovými tolerancemi. Vnější průměr niklové trubky se nesměl lišit o více jak 0,00762mm od jmenovitého rozměru a šířka mezery se od 0,25mm nesměla lišit o více jak 0,0508mm [7]. Z důvodu těchto přísných tolerancí byly 15m dlouhé trubky svařovány z několika kratších trubek.

Pára sloužící k ohřevu vnitřní niklové trubky byla produkována ze začátku v elektrárně pro projekt K-25, který ještě neběžel. Pára z kotlů o parametrech 500°C a 8,62MPa byla škrcena na parametry požadované kolonou, tedy 286°C a 6,9Mpa. Pára ohřívala vnitřní trubku a kondenzovala při tlaku 6,55Mpa a teplotě 280°C. Po zahájení provozu K-25 byla pro S-50 postavena nová elektrárna a využily se kotle na olej z vyřazených válečných lodí, ale s hodícími se parametry pro tento účel. Celková spotřeba páry pro separační proces byla za plného provozu všech kolon 45 360kg/hod.

Plánovaného obohacení na 90% se nedařilo dosáhnout, tak se vedení rozhodlo, že bude touto metodou obohacovat velké množství UF_6 na velmi malý stupeň obohacování a tento mírně obohacený UF_6 použijí jako vstupní materiál v jiných obohacovacích projektech, hlavně calutronech alpha po přeměně UF_6 na UCl_4 , nebo do plynné difuze bez nutnosti změny chemického složení směsi uranu.

4.3 Ekonomická rozvaha

Celý projekt S-50 byl po válce odhadnut na 32,6 milionu tehdejších dolarů a denní operační náklady činily asi 63 000 dolarů. Většina z denních operačních nákladů byla vynaložena na produkci páry v kotlích, celý proces S-50 potřeboval 45tun páry hodinově, kaskáda 102 kolon potřebovala tepelný výkon 11,6MW, těchto kaskád bylo celkem 21 a byly tvořeny celkem 2142 kolonami s celkovým tepelným příkonem 243,6MW.

Celkem bylo použito 1700tun niklu a mědi. (Příloha obr. 9 Kolony S-50)

Začátek produkce v S-50 byl v říjnu 1944, v tomto měsíci se podařilo obohatit 4,76kg uranu, poté se výroba zvyšovala, až dosáhla maxima v červnu 1945 – 5774kg uranu za měsíc. Celkově se v projektu S-50 za celou jeho činnost obohatilo 25 628kg uranu. Všechny uran byl obohacován na 0,85% a poté použit jako vstup do elektromagnetické separace, nebo plynné difuze.[7]

Tento způsob separace izotopů je prakticky i konstrukčně velmi jednoduchý, ale velmi malý obohacovací výkon kolony a obrovské množství potřebného tepla z něj činí velmi náročnou metodu pro obohacování uranu. Je ho možné ale použít pro získávání malých vzorků izotopů pro laboratorní účely, jako například v laboratořích Mound na obohacování ^{13}C z 90% na 99%.[7]

5 Separace plynou difuzí

5.1 Historie

Základy této metody položil skotský fyzik a chemik Thomas Graham v roce 1848 formulováním Grahamova zákona. V praxi byla tato metoda použita poprvé při oddělování směsi plynů, například kyslíku a dusíku ze vzduchu, nebo helia ze zemního plynu.

S použitím této metody pro obohacování uranu se začalo experimentovat ve 40. letech 20. století a v průmyslovém měřítku byla poprvé použita v projektu Manhattan v Oak Ridge Tennessee s kódovým označením K-25. V červnu 1943 začala stavba komplexu o celkové rozloze 190 000m² a také největší budovy na světě v té době, celkem 1500m dlouhá a až 250m široká (Příloha obr. 10). Tento monstrózní projekt byl dokončen k začátku roku 1945, kdy se také začalo s obohacováním uranu tímto způsobem. Projekt K-25 byl po druhé světové válce rozšířen o budovy K-27, K-29, K-31 a K-33 a celý komplex produkoval obohacený uran pro energetické reaktory a vysoce obohacený uran pro jaderné hlavice v důsledku zbrojního závodu USA se sovětským svazem za takzvané studené války. Obohacovací snažení zde trvalo až do roku 1985, kdy byl celý komplex uzavřen a v prosinci 2013 byly všechny budovy zbourány - Příloha obr. 11, Příloha obr. 12, Příloha obr. 13.

Plynná difuze byla po druhé světové válce nejpoužívanější obohacovací metodou, v průmyslovém měřítku byla používána v USA, SSSR, Francii, Británii, Číně a severní Africe. V dnešní době už poměr obohaceného uranu touto metodou začíná klesat, v roce 2000 byl až 50% a v roce 2010 asi 25%. V roce 2017 je odhadováno, že všechny obohacovací závody využívající plynou difuzi budou odstaveny z provozu.

5.2 Princip

Proces separace plynou difuzí je založen na Grahamově zákonu a Avogardově zákonu, přesněji na rovnosti kinetických energií všech molekul v plynu díky neustálým srážkám molekul a okamžitému sdílení přebytku kinetické energie jedné molekuly s okolními molekulami. Z toho plyne, že ve směsi UF₆ mají všechny molekuly plynu stejnou kinetickou energii, ale kvůli rozdílným hmotnostem ²³⁵UF₆ a ²³⁸UF₆ mají molekuly rozdílnou rychlost. Pokud je takový plyn uzavřen v nádobě s velmi malými otvory, řádově 20nm, bude díky větší rychlosti pravděpodobnější průchod molekuly ²³⁵UF₆ nežli ²³⁸UF₆.

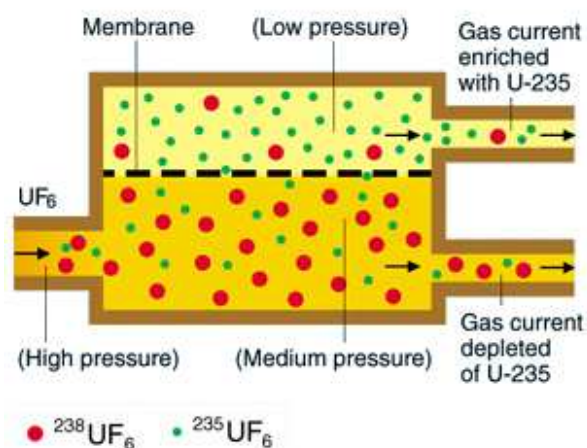
V roce 1941 byla experimentálně ověřena možnost obohacování uranu touto metodou, kdy byla použita membrána ze zinku s póry 10-25nm a vědci pozorovali nepatrně větší koncentraci molekul ²³⁵UF₆ za bariérou, než byla koncentrace vstupujícího plynu. Podle Grahamova zákona jde vypočítat teoretické zvýšení koncentrace lehčích molekul obsahujících ²³⁵U.

$$\alpha = \sqrt{\frac{M_B}{M_A}} = \sqrt{\frac{352.041206}{349.034348}} = 1.00429815847 \quad (13)$$

α	separační poměr [-]
M_A	molární hmotnost ²³⁵ UF ₆ [g/mol]
M_B	molární hmotnost ²³⁸ UF ₆ [g/mol]

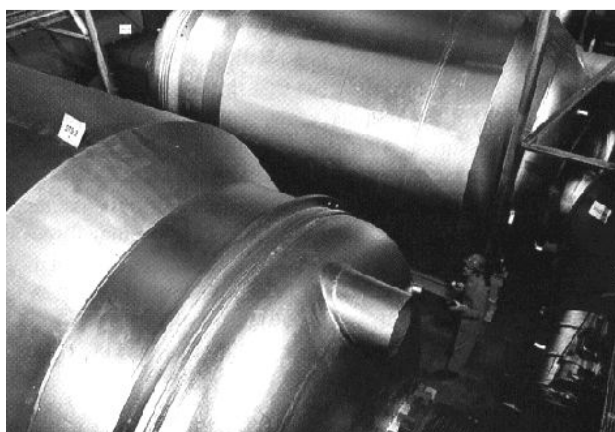
Prakticky bývá ale separační poměr ještě menší, asi 1,002-1,003. Kvůli takto malému separačnímu poměru není možno obohatit uran jedním průchodem, ale je nutno proces opakovat několiktisíckrát. Z tohoto důvodu jsou difúzní separátory zapojeny do kaskád (Více informací v kapitole 2.5 Kaskády)

Základ difúzního separátoru je konstrukčně velmi jednoduché zařízení, hermetická nádoba s jedním vstupem, kterým se přivádí plyn k separaci a dva výstupy, jeden pro obohacený materiál, druhý pro ochuzený materiál a mezi nimi je porézní membrána, na které dochází k separaci.



Obr. 18 Difúzní separátor [29]

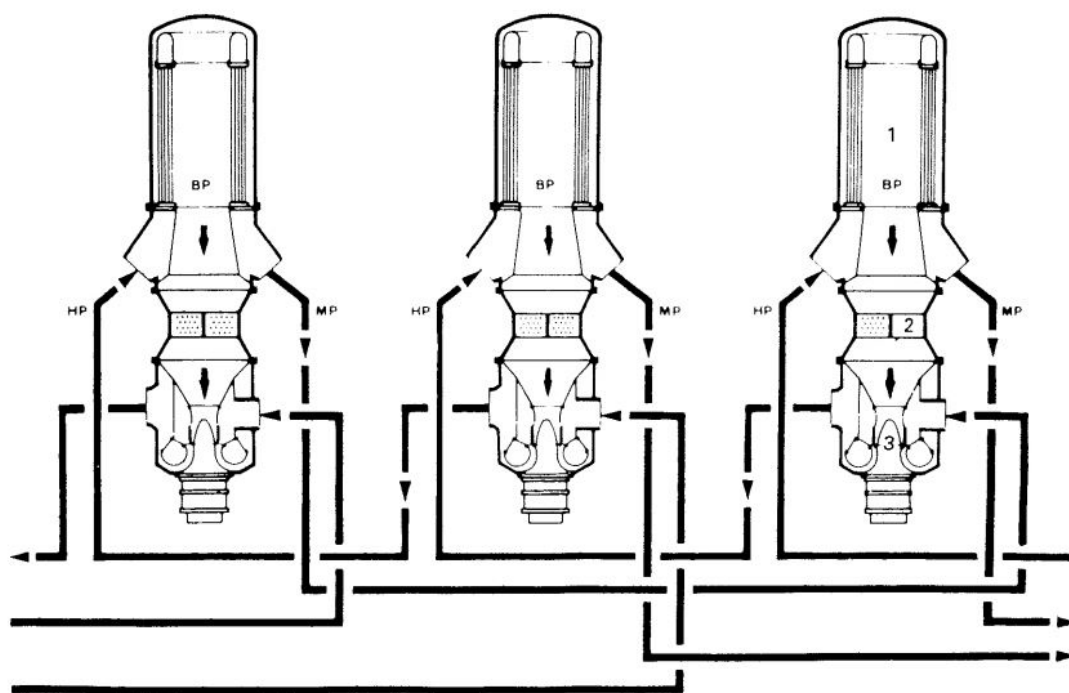
Právě tato membrána je nejkritičtějším prvkem celého separátoru, jsou na ni kladené velmi vysoké požadavky, zejména na póry v ní. Ty musí mít velmi malé a přesné rozměry (10-25nm), aby docházelo k separaci izotopů, a navíc jich musí být velké množství, řádově $10^{12}/\text{cm}^2$, aby se mohlo separovat velké množství materiálu. Navíc musí odolávat tlakovému diferencíálu za a před membránou, který se pohybuje dle konstrukce separátoru od $\frac{1}{4}$ do $\frac{3}{4}$ atmosféry dle konstrukce modulu. Membrány jsou vyráběny většinou ze zinku, hliníku, nebo hliníkových a zinkových slitin, případně keramiky. V každém případě je nutno použít materiál odolávající korozi v prostředí plynného UF_6 .



Obr. 19 Difuzní separátor použitý v K-25 spolu s technikem za účelem měřítka[30]

V praxi jsou separátory poměrně velkých rozměrů (Příloha obr. 14), aby byl co největší povrch separační membrány, na Obr. 19 lze vidět separátor z K-25 spolu s technikem. V závodu K-25 se používaly separátory válcového

tvaru, které měly uprostřed rovnoběžně s osou membránu s póry, kde docházelo k separaci (Obr. 18). Po druhé světové válce se s nutností obohacovat velké množství uranu v důsledku studené války mezi USA a SSSR metoda značně zdokonalila. Technologie tvorby membrán pokročila, bylo možné vytvářet membrány s velmi přesnými rozměry pórů a zvětšit jejich množství. USA a USSR své membrány vytvářeli slinováním zinkového prachu a Francouzi zvolili k výrobě porézních bariér keramiku. Konstrukce samotných modulů se také zlepšila, od jedné rovné přepážky se upustilo a zvolila se konstrukce obsahující velké množství membránových trubek s průměrem několika centimetrů, tím se zvýšila plocha membrány, průtok plynu a také separační poměr modulů. Průtok plynu těmito moduly se pohybuje až na 250 kg/s UF_6 u největších modulů.



Obr. 20 Moderní moduly pro plynou difuzi francouzské konstrukce EURODIF [24]

Kaskády při separaci plynou difuzí jsou konstrukčně o něco složitější, protože vstupující plyn UF_6 do separátorů musí mít určité parametry, aby separační proces fungoval co nejefektivněji. Teplota plynu musí být udržována v určitém rozmezí. Dostatečně nízká, aby se molekuly plynu nepohybovaly moc rychle a průchodem póry v membráně docházelo k obohacování uranu a zároveň dostatečně vysoká, aby UF_6 nekondenzoval v trubkách a separátorech. Před vstupem plynu do dalšího separátoru musí být plyn znovu tlakován pomocí odstředivého dmyhadla a ochlazen, protože se v dmyhadle zahřál. K ochlazení se výměníky s médii: C_2 , F_4 , Cl_2 , [15] ty byly totiž nereaktivní s UF_6 v případě, že by došlo k poruše tepelného výměníku. Celý proces si tedy vyžádal velké množství techniky Příloha obr. 15.

Tab. 3 Parametry čerpadel v kaskádě EUODIF [24]

Typ	Malé	Střední	Velké
Otáčky rotoru [Hz]	3000	3000	1500
Příkon [kW]	600	1500	3100
Průtok [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]	7	10	46,2
Průtok [kg s^{-1}]	30	80	190

Čerpadla a chladiče jsou u modernějších modulů (Obr. 20) integrovány do jednotlivých modulů, což vede ke zvětšení univerzálnosti a možnosti přepojit kaskádu modulů dle potřeby obohacení výsledného produktu.

Teplota UF_6 bývá udržována asi v rozmezí 60-70°C a tlak na vstupu do separační komory je mírně pod tlakem barometrickým. Tím je v případě netěsnosti, nebo povolení spoje zabráněno úniku toxického plynu do budovy. Tlak za přepážkou je podstatně nižší (asi desetina atmosféry) než na vstupu, to zvyšuje průtok plynu přes póry přepážky a brání difuzi molekul $^{235}\text{UF}_6$ zpět.

5.3 Ekonomická rozvaha

Obohacování plynou difúzí je ekonomicky náročný proces, celý separační komplex zabírá ohromné území, je potřeba velké množství speciálního vybavení – separačních komor, membrán, trubek a ventilů spolu s čerpadly a chladiči. Přičemž veškeré vybavení, které přichází do styku s plynem UF_6 musí být korozivzdorné. Koroze v separačním systému by způsobila kontaminaci plynu a ucpávání membrán, to by vedlo ke snížení separačního poměru a ztrátám obohaceného uranu. Výroba membrán, které jsou nejkritičtější součástí v separačním procesu, je technicky velmi náročný a komplikovaný proces.

Výstavba projektu K-25 v roce 1943-1945 stála USA celkem 512 milionů dolarů, téměř 6,7 miliardy dolarů v dnešní měně. Mimo obrovskou pořizovací cenu obohacovacího zařízení jsou vysoké i provozní náklady takového zařízení. Na vrcholu produkce potřeboval komplex K-25 k provozu 12 000 zaměstnanců, kteří řídili proces a prováděli obsluhu všech strojů. Udržovat obrovské množství proudícího plynu o teplotě 60-70°C a po každém průchodu separátorem jej čerpadlem znovu tlakovat a ochlazovat je energeticky velmi náročné. Na vrcholu studené války probíhalo v USA obohacování uranu v obrovském měřítku použitím plyné difuze a odhaduje se, že 7% veškeré energie v té době produkované v USA spotřebovaly tyto obohacovací závody.

Obohacování plynou difúzí má ale i několik výhod, dokáže pracovat s obrovským množstvím materiálu - u velkých komplexů řádově stovky až tisíce tun UF_6 mohou být zpracovávány bez nutnosti zadržovacích nádrží, nebo manipulace s cisternami. Zároveň je také mnohem vhodnější k průmyslovému obohacování uranu, než například elektromagnetická separace, nebo tepelná difuze.

Energetická náročnost všech operací se odhaduje na 2300-3000 kWh/SWU.[20]

6 Centrifugální separace

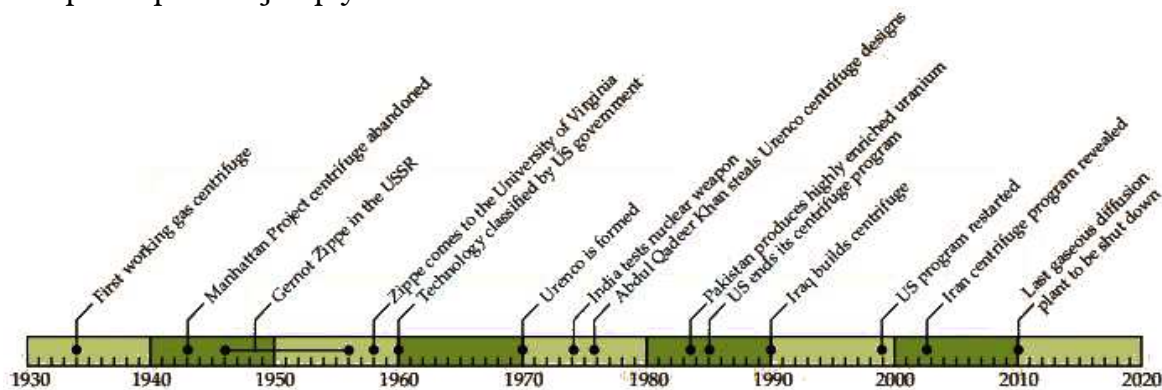
6.1 Historie

Separací proces pomocí centrifugy byl navrhnut brzo po objevení existence izotopů, v roce 1919 tuto možnost navrhli britští vědci Lindemann a Aston, při svých experimentech se ale setkali s velkým množstvím konstrukčních problémů, které nešly v té době řešit – motor ve spodní části svislé centrifugy produkoval teplo, které zahřívalo materiál v centrifuze, následné konvekční proudy separovaného materiálu promíchávaly obsah centrifugy a zabráňovaly tak separaci izotopů. Až v roce 1934 se podařilo na univerzitě ve Virginii zkonstruovat centrifugu a separovat izotopy chlóru, Jesse Beams vyřešil problém s ohříváním materiálu pomocí izolace – rotor umístil do vakuové komory a uložil na axiální kluzné ložisko. Principiálně tato konstrukce fungovala, ale konstrukční úpravy ložiska, aby bylo schopno pracovat ve vakuu, způsobily tak velké tření, že mírně ohřívalo celou centrifugu, snižovalo separační schopnost a nepříjemně zvyšovalo spotřebu energie.

USA s touto metodou experimentovalo za druhé světové války, ale vědcům se nedařilo vyřešit problém s ložisky a po několika nehodách byl výzkum ukončen a pozornost přesunuta k plynné difuzi.

Po skončení druhé světové války a demonstrace amerických atomových zbraní tuto metodu začal rozvíjet sovětský svaz s pomocí vědců z Německa. G. Zippe vyřešil problém energetické náročnosti použitím kombinace jehlového ložiska a magnetického uložení, tím byl odstraněn hlavní problém této obohacovací technologie a začal její rozsáhlý vývoj.

Od 70. let 20. století se začaly centrifugy využívat k průmyslovému obohacování uranu a nahrazují produkci odstavovaných obohacovacích komplexů používající plynnou difuzi.



Obr. 21 Vývoj centrifug na časové ose [17]

6.2 Princip

Centrifuga se skládá z dlouhého, svislého válce uloženého v ložiscích na hřídeli s elektromotorem, který válcem velmi rychle otáčí. Hnaný válec rotuje v uzavřeném obalu při takřka vakuu, aby nebyl ničím brzděn. Do rotoru je přiveden UF_6 v plynném stavu a dochází k separaci lehčího $^{235}\text{UF}_6$ od těžšího $^{238}\text{UF}_6$ viz Obr. 24.

Ke vzniku oblastí s rozdílnými koncentracemi uranu vzniká v důsledku tlakové difuze – rotační pohyb válce vytváří velmi silné odstředivé

zrychlení, řádově až tisícinásobky tíhového zrychlení Země (desetitisíce ms^{-2}), což vede k velmi vysokému tlaku plynu, který jde popsat rovnicí číslo 14.

$$p(r) = p(0)e^{\frac{M\Omega^2 r^2}{2RT}} \quad (14)$$

Jak jde vidět, parciální tlak plynu v centrifuze je i funkcí molární hmotnosti, lze tedy pro molekuly $^{235}\text{UF}_6$ a $^{238}\text{UF}_6$ napsat rovnice zvlášť. Pro zjednodušení použijí označení A pro ^{235}U a B pro ^{238}U .

$$p_A(r) = p(0)e^{\frac{M_A\Omega^2 r^2}{2RT}} \quad (15)$$

$$p_B(r) = p(0)e^{\frac{M_B\Omega^2 r^2}{2RT}} \quad (16)$$

Každý z izotopů má maximální parciální tlak a maximální koncentraci daného izotopu v jiném místě centrifugy. Těžší izotop je koncentrován blíže ke stěně rotoru a lehčí je koncentrován blíže ke středu rotace (Obr. 27). Odebíráním plynu z těchto míst dostáváme ochuzený a obohacený výsledek separačního procesu a lze teoreticky vypočítat separační poměr.

$$\alpha = \frac{\frac{p_A(0)}{p_B(0)}}{\frac{p_A(r)}{p_B(r)}} = e^{\frac{(M_A - M_B)\Omega^2 r^2}{2R}} \quad (17)$$

α	separační poměr [-]
M_A	molární hmotnost $^{235}\text{UF}_6$ [g/mol]
M_B	molární hmotnost $^{238}\text{UF}_6$ [g/mol]
Ω	uhlová rychlost rotoru [rad.s^{-1}]
r	poloměr rotoru [m]
R	univerzální plynová konstanta [$\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$]
T	teplota plynu [K]

Tyto rovnice ale platí pro plyn, který v centrifuze koná pouze rotační pohyb a měl dostatek času, aby všechny molekuly plynu difundovaly do rovnovážného rozmístění.

V praxi ale dochází v centrifuze k axiálnímu proudění plynu, u stěny má materiál v centrifuze tendence prudit směrem dolů a blíže k ose rotace stoupá směrem vzhůru. Toto proudění vyvolává axiální separační proces, který napomáhá celkový separaci izotopů a jde vidět na Obr. 23.

Součtem axiální separace prouděním a radiální tlakové difuzní separace dostáváme difuzní proudy, které zde uvedu pomocí rovnic v cylindrických souřadnicích:

$$J_A \hat{r} = -cD_{AB} \left[\frac{\delta N}{\delta r} + \frac{(M_A - M_B)N(1-N)}{RT} \Omega^2 r \right] \quad (18)$$

$$J_A \hat{z} = -cD_{AB} \left[\frac{\delta N}{\delta z} \right] \quad (19)$$

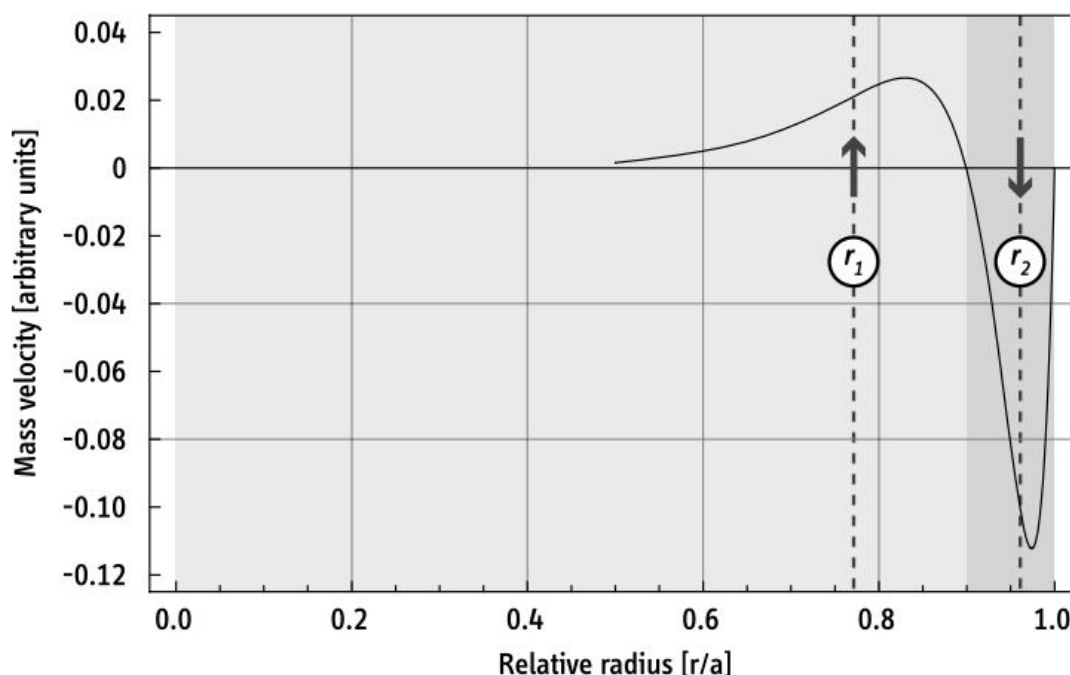
$$J_A \hat{\theta} = 0 \quad (20)$$

r, z, θ válcové (cylindrické) souřadnice s počátkem v ose rotace na dně rotoru [m, m, rad]

c	molární hustota [mol m^{-3}]
D_{AB}	Koeficient difuze [-]
T	teplota plynu [K]
R	univerzální plynová konstanta [$\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$]
Ω	uhlová rychlost rotoru [rad s^{-1}]
M_A	molární hmotnost $^{235}\text{UF}_6$ [g/mol]
M_B	molární hmotnost $^{238}\text{UF}_6$ [g/mol]
N	molární zlomek $^{235}\text{UF}_6$ ve směsi $^{235}\text{UF}_6$ a $^{238}\text{UF}_6$ [-]

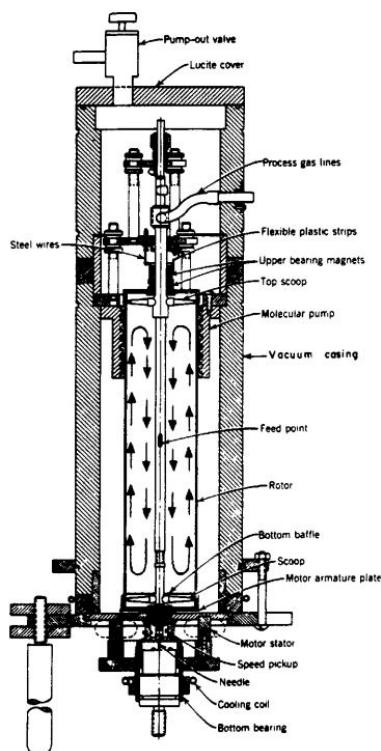
Rovnice (18) popisuje difuzi v radiálním směru a je součtem difuze způsobené prouděním a tlakové difuze. Rovnice (19) popisuje difuzi v axiálním směru, kde nedochází k tlakové difuzi ale pouze k difuzi způsobené prouděním. Z rovnice (20) je zřejmé, že v azimutálním směru nedochází k žádné difuzi, protože je centrifuga a celý separační proces osově souměrný podle osy rotace.

Pokud v centrifuze probíhá axiální proudění (Obr. 22), výrazně se zvyšuje její obohacovací poměr. Aby byl tento proud v obohacovacím procesu významný je nutno jej vytvářet. Existuje několik metod – systémem přepážek v rotoru Obr. 26, konvekčním prouděním vyvolaného tepelným gradientem, nebo pumpami mimo centrifugu Obr. 25.

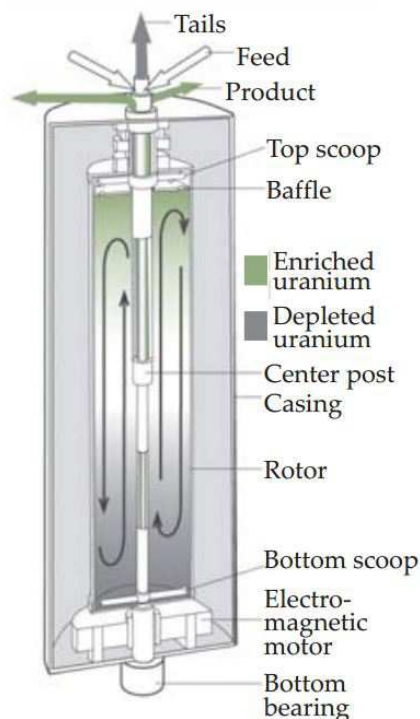


Obr. 22 Proudění v centrifuze [17]

Teoreticky tedy pro centrifugu s rotorem o průměru 10 palců - 0,254m, rotující uhlovou rychlostí 2400rad/s – frekvencí 382Hz, a plynem o teplotě 27°C je separační poměr 1,162, což je mnohem více, než u plyné difuze, nebo tepelné difuze. Vyšší separační poměr je ale vykoupěn složitou konstrukcí centrifug a velkými technologickými nároky.



Obr. 23 Centrifuga konstrukce "Zippe" [15]



Obr. 24 Konstrukce centrifugy [17]

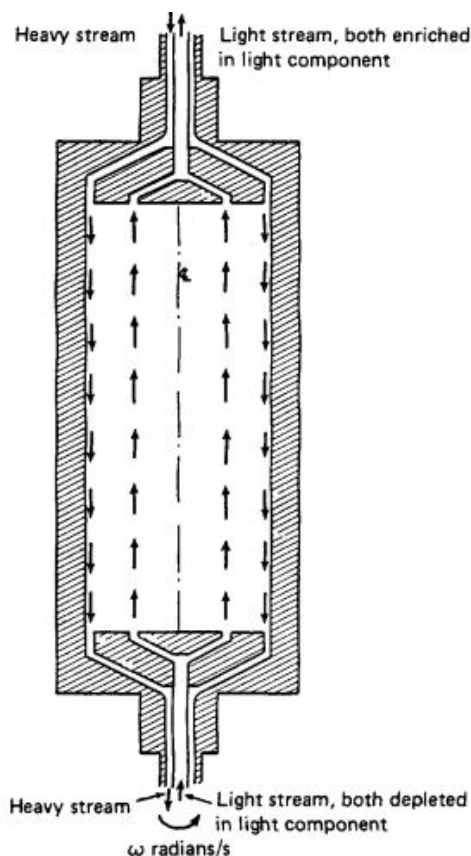
Obohacovací potenciál závisí na velkém množství parametrů, z hlavních bych uvedl průměr rotoru, rychlost jeho rotace a jeho výška, vzniklo tedy velké množství konstrukcí. V Rusku vyvíjené centrifugy mají tendenci být krátké, řádově v metrech, ale s velkými průměry rotoru, i nad 20cm a spoléhající na obohacování tlakovou difúzí. Centrifugy evropského designu URENCO (spolupráce Německa, Nizozemí, USA a Británie) pracuje s vyváženou konstrukcí pracující jak s tlakovou difúzí tak axiálními proudy a bývají do 7m dlouhé s rotory do průměru 10cm. USA ve svém samostatném projektu preferuje velmi vysoké rotory s výškou až 12m a velkými separačními výkony na jeden stroj.

Tab. 4 Některé typy centrifug [12]

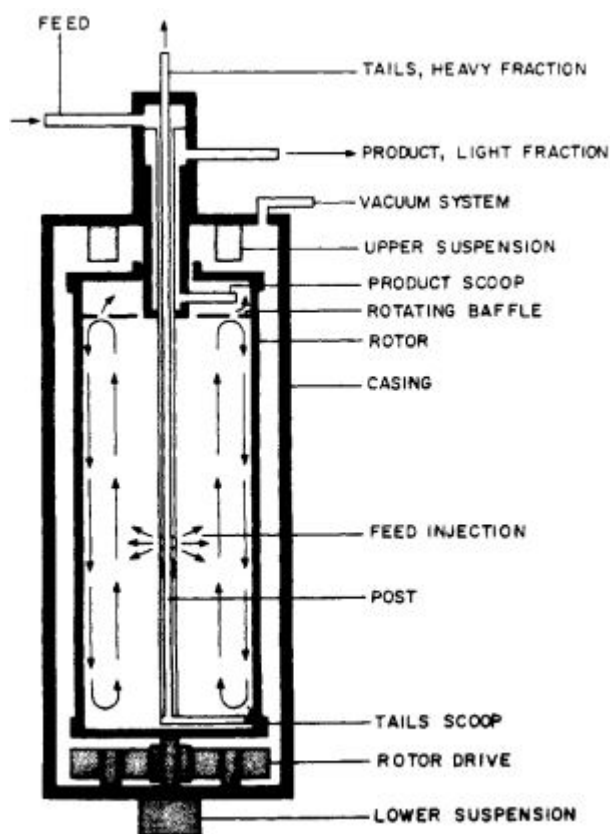
Typ	Název	Použití	Materiál	$v_{\max}$ [ms ⁻¹]	r [cm]	l [m]	P [SWU/rok]
	Zippe	1940-1950	Al	350	7,4	0,3	0,44
P-1	SNOR/CNO R	1960-1967	Al	350	10	2	2 až 3
P-2	G-2	1960-1967	Ocel	485	15	1	5 až 6
P-3	4-M	1970-1975	Ocel	485	n/a	2	12
P-4	SLM (TC-10)	1975-1980	Ocel	500	15	3,2	21
	TC-11	1980-1990	Uhlíkové vlákno	600	n/a	3	n/a
	TC-12	1990-2000	Uhlíkové vlákno	620	20	3	40
	TC-21	od 2000	Uhlíkové	770	20	5	100

			vlákno				
	AC100	od 2000	Uhlíkové vlákno	900	60	12	300

$v_{\max}$ Maximální obvodová rychlost rotoru [m s^{-1}]
 r Poloměr rotoru [m]
 l Výška rotoru [m]
 P Separační výkon [SWU/rok]



Obr. 25 Centrifuga používající cirkulaci vyvolanou externími pumpami [15]



Obr. 26 Centrifuga vytvářející proudění pomocí přepážek uvnitř rotoru [15]

Rotor

Je asi hlavním komponentem centrifugy a jeho konstrukce největším způsobem ovlivňuje separační výkon stroje. V důsledku rychlé rotace vznikají v konstrukci rotoru velká pnutí a musí být proto vyroben z materiálu, který dokáže takové zatížení snést. Maximální obvodová rychlost rotoru jde určit podle rovnice (21) a uhlová rychlost, případně frekvence je poté z (22).

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{R_m}{\rho}} \quad (21)$$

$$\Omega = \frac{v_{\max}}{r}; f = \frac{\Omega}{2\pi} \quad (22)$$

Ω Úhlová rychlost rotoru [rad s^{-1}]

$v_{\max}$	Maximální obvodová rychlost rotoru [m s^{-1}]
r	poloměr rotoru [m]
f	Otáčky rotoru [Hz]
ρ	Hustota [kg/m^3]
R_m	Meze pevnosti v tahu [MPa]
E	Modul pružnosti [GPa]
$v_{\max}$	Maximální obvodová rychlost rotoru [ms^{-1}]
v	Obvodová rychlost [ms^{-1}]
α	Separační poměr [-]
p_o/p_s	Poměr tlaku na obvodu centrifugy a v ose rotace [-]

Tab. 5 Materiál rotoru, vlastnosti a maximální rychlosti [12]

Materiál	Hliníkové slitiny	Ocel	Titan a jeho slitiny	Vysokopevnostní ocel	Skelné vlákno	Uhlíkové vlákno
ρ [kg/m^3]	2800	7800	4600	7800	1800	1600
R_m [MPa]	448	1381	897	1932	490	829
E [GPa]	71	207	114	207	72,4	-
$v_{\max}$ [ms]	400	421	442	498	522	720

Tab. 6 Teoretické separační poměry [12]

v [ms^{-1}]	α [-]	p_o/p_s [-]
300	1,056	573
400	1,101	80E3
500	1,162	46E6
600	1,242	11E10
700	1,343	10E14
800	1,469	41E18
900	1,628	66E23
1000	1,825	44E29

Mimo maximální rychlosti je na materiál rotoru kladen i požadavek korozivzdornosti v plynném UF_6 , stejně tak jako na další díly centrifugy – vtokové a odtokové soustavy plynu, přepážky v rotoru případně jakékoliv další prvky, které jsou v kontaktu s UF_6 .

Největším konstrukčním problémem při navrhování rotoru je dynamické vyvážení rotoru, v důsledku výroby a nedokonalé homogenity materiálu nelze v praxi vytvořit dokonale vyvážený rotor a kvůli velmi velkým otáčkám, které dosahují i 400Hz (24 000rpm), se i velmi malé nevyvážení může stát velkým problémem. V důsledku vibrací se sníží separační poměr, dojde k většímu namáhání ložisek a v potaz přichází i únava materiálu. Zvláště u delších rotorů používaných v USA a URENCO je dalším problémem rezonanční, neboli kritická, rychlost rotoru, při které dochází ke zvětšení i mírné házivosti nad přijatelné meze.

Motor

Na pohon rotoru se používá speciálně konstruovaný synchronní motor pro provoz ve vakuu s vysokou stabilitou. Motory jsou napájeny střídavým

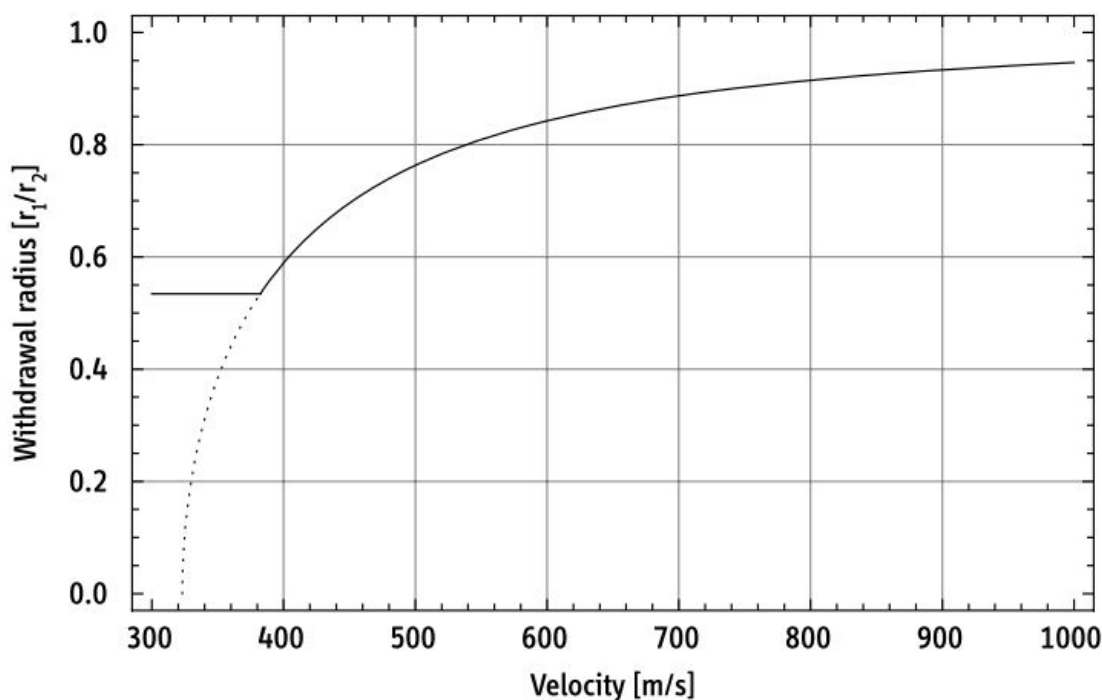
proudem s nízkým napětím a proměnnou frekvencí, kterou vytvářejí frekvenční měniče a určují tak otáčky rotoru, běžně se frekvence proudu pohybuje od 600 do 2000Hz.

Vakuový plášť

Rotor s motorem a ložisky je uzavřen ve speciálním hermetickém kontejneru, uvnitř kterého je pomocí molekulární pumpy udržováno vakuum, aby se zamezilo tření rotoru se vzduchem a zabránilo se tak jeho ohřevu a ztrátám. Sekundárním účelem pláště je v případě selhání ložisek a havárie rotoru zamezit rychle pohybujícím se troskám poškodit další centrifugy, nebo jiné zařízení v budově. Obal slouží také k izolaci rotoru od vibrací z jiných strojů a zařízení v okolí.

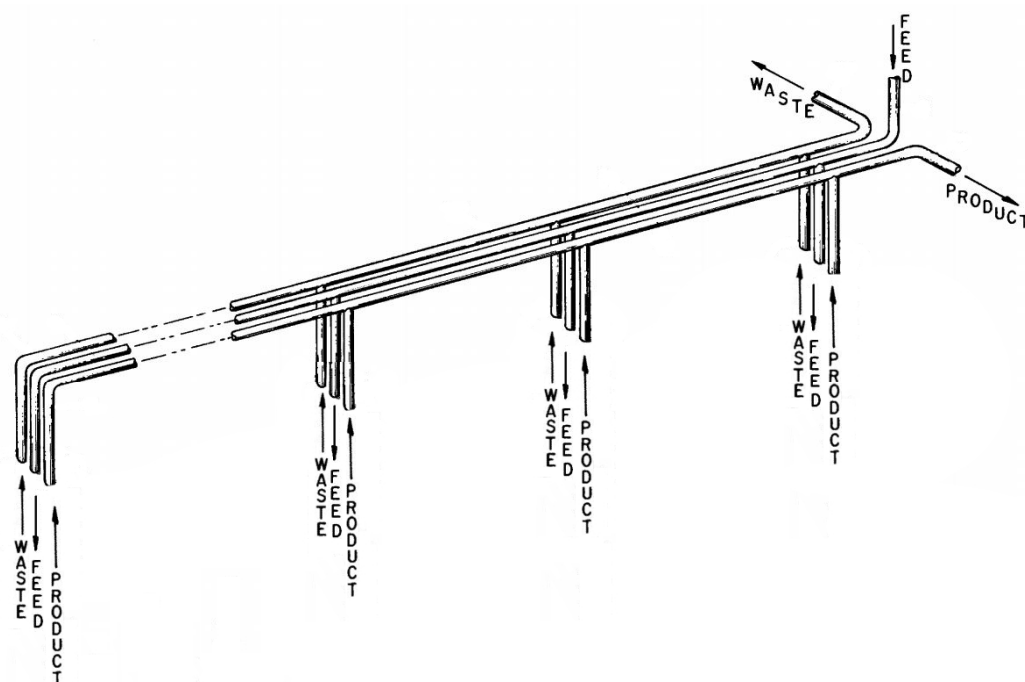
Prívod plynu do a z rotoru

Prívod UF_6 do centrifugy je středem rotoru, kde je uvolněn do samotné centrifugy a poté dělen separačním procesem na místa s obohaceným UF_6 a s ochuzeným UF_6 . $^{238}\text{UF}_6$ je koncentrováno na vnitřním plášti rotoru a $^{235}\text{UF}_6$ je více koncentrováno blíže středu. Ochuzený pramen se tedy odebírá ze samého okraje rotoru a místo odběru obohaceného materiálu se pohybuje asi od poloviny průměru rotoru směrem ke středu s rostoucí obvodovou rychlostí v závislosti, která je vyznačena v Obr. 27.



Obr. 27 Závislost místa odběru $^{235}\text{UF}_6$ na obvodové rychlosti rotoru [25]

Kaskády centrifug



Obr. 28 Schéma zapojení strojů do kaskády [12]

Velké separační poměry a poměrně malý průtok materiálu umožňují centrifugy skládat do velmi širokých kaskád s malým množstvím fází. Jak jde vidět například v Tab. 7 v kaskádě pro výrobu lehce obohaceného uranu na výrobu paliva do energetického jaderného reaktoru.

Tab. 7 Příklad kaskády [12]

Číslo fáze	Míra obohacení [%]	Průtok uranu [kg/den]	Počet centrifug
11	2,36 (Výsledný produkt)	177	102
10	1,93	392	227
9	1,58	654	379
8	1,30	974	564
7	1,06	1365	790
6	0,87	1843	1066
5	0,71 (Vstupní materiál)	2428	1405
4	0,58	2115	1224
3	0,47	1733	1003
2	0,39	1266	733
1	0,32 (Ochuzený výstup)	697	403

Příklady zapojení kaskády lze vidět v Příloha obr. 21 a Příloha obr. 22.

Díky vysokému obohacovacímu poměru nemusí plyn procházet tolika fázemi, stačí díky němu plyn podrobit separačnímu procesu v menším počtu fází. Není proto nutno plynu upravovat vstupní vlastnosti do separačního

procesu tolikrát, jako například u plyné difuze bylo nutno tlakovat plyn axiálním dmychadlem a chladit v tepelném výměníku. To vede ke snížení nákladů na SWU a proto se nyní začínají centrifugy upřednostňovat.

6.3 Ekonomická rozvaha

Po ekonomické stránce je obohacování uranu pomocí centrifugy velice výhodné, nejenže je separační poměr mnohem větší, než například u plyné a tepelné difuze, ale je i méně energeticky náročný. Při stejné vykonané obohacovací práci potřebuje centrifugální proces méně než 10% energie, než by potřebovala plyná difúze. Hlavně protože není potřeba plyn tolikrát tlakovat a chladit mezi jednotlivými separačními procesy. Zároveň centrifugy nepotřebují takové množství obsluhy jako ostatní metody, většina procesů je řízena počítačem a nutnost údržby je minimální. Vzhledem k malému rozměru centrifugy, vysokému separačnímu poměru a poměrně malému průtoku materiálu není potřeba velké množství trubek a ventilů. Celý obohacovací komplex využívající obohacování centrifugální metodou zabírá menší plochu v porovnání s plynou difúzí a nepotřebují ani tak obrovské zázemí.

Energetické a prostorové nároky separace pomocí centrifugy jsou v dnešní době ideální pro použití metody ve velkém průmyslovém měřítku, hlavní a asi jedinou nevýhodou je velká technická náročnost. Vývoj nových konstrukcí, nových materiálů a jejich testování vyžaduje ohromné finanční prostředky a velmi kvalifikované vědce, proto můžeme občas pozorovat využití průmyslové špionáže. Která je jednodušší a finančně i technologicky méně náročná, než vývoj vlastních technologií a konstrukci (Pákistán).

Energetická náročnost je 100-300 kWh/SWU. [20]

7 Aerodynamická separace

7.1 Historie

S procesem obohacování uranu aerodynamickou metodou se zabývalo Německo a země v jižní Africe. Byly vyvinuty dva základní principy, v Německu to byla trysková metoda a v Africe vírová separační metoda Helikon.

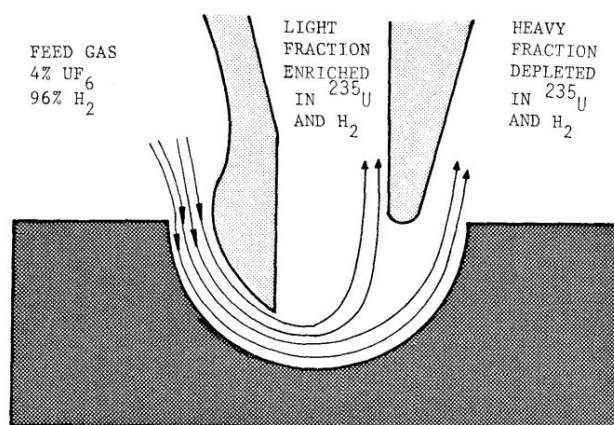
V dnešní době fungují jen menší obohacovací závody, v Brazílii je Německem postavený závod s kapacitou 180 000 SWU/rok, který obohacuje uran pro použití v Brazílských jaderných reaktorech. V Africké Valindabě byl v roce 1981 otevřen závod s kapacitou 6 000 SWU/rok využívající vírovou separaci. [17]

7.2 Princip

Je velké množství procesů, které by se daly charakterizovat jako aerodynamická separace. Většina z nich používá k separaci tlakový gradient podobně jako centrifuga. V laboratorních podmínkách byly vyvíjeny i metody využívající kombinace tlakového a hustotního gradientu a interakce dvou velmi rychlých proudů plynů, tyto metody ale nebyly zatím zdokonaleny do míry, která by vedla k dalšímu vývoji.

Trysková metoda

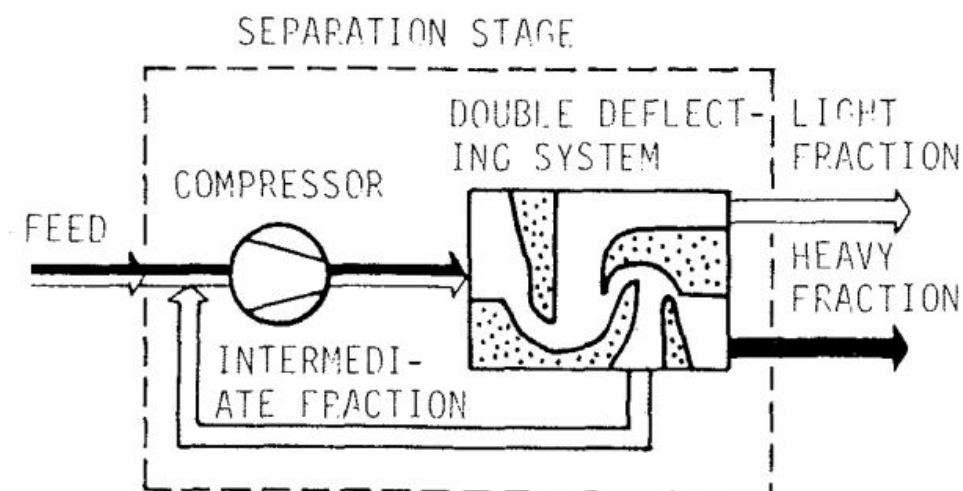
Byla vyvinuta E. W. Beckerem, základem této metody je vhánění směsi 4% UF_6 a 96% H_2 rychlostí až 400ms^{-1} do tvarové trysky, kde je plyn stěnou tvarové trysky nucen velmi rychle změnit směr pohybu na rotační pohyb v záhybu trysky s rádiusem až 0,1mm. To vede k vytvoření velkého tlakového gradientu podobně jako v centrifuze, těžší molekuly $^{238}\text{UF}_6$ opisují trajektorii o větším poloměru a lehčí $^{235}\text{UF}_6$ se stáčí v menším poloměru. Dosahuje se zrychlení až $1,6 \cdot 10^9 \text{ms}^{-2}$, což je srovnatelné se zrychlením v centrifugách. Tyto oddělené proudy se poté separují pomocí přepážky a vzniká tak jeden obohacený výstup a jeden ochuzený výstup plynu. Jediná tryska má ale velmi malý separační poměr, proto je nutno používat kaskádového zapojení strojů, navíc je tryska omezena velmi malým průtokem plynu a je nutno použít v jednom stroji velké množství identických trysek pro dostatečný průtok plynu.



Obr. 29 Schéma trysky [25]

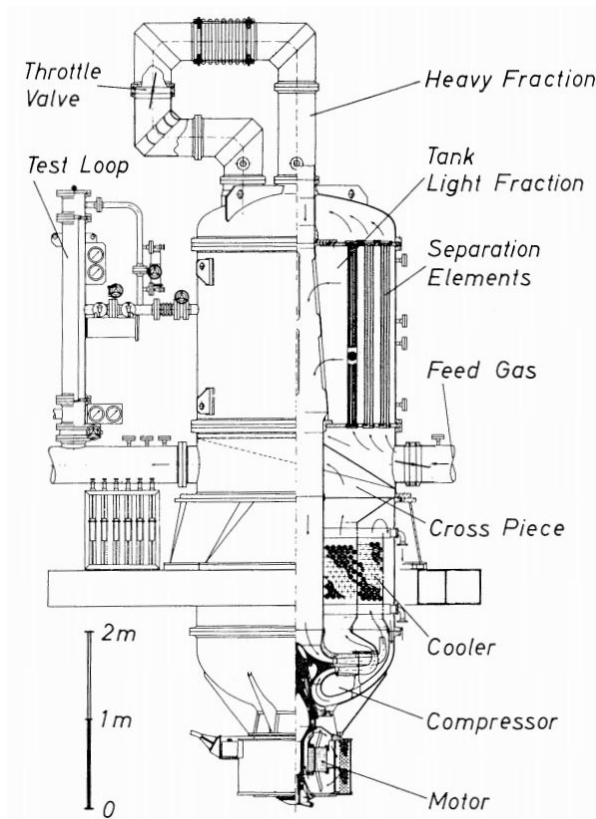
Vodík ve směsi se používá z několika důvodů a je klíčový pro tuto metodu – snižuje průměrnou hmotnost molekul ve směsi, což vede k zvýšení rychlosti zvuku ve směsi. Díky tomu je možno vhánět směs do trysky rychlostí až 400ms^{-1} při zachování laminárního proudění. Třecí síly mezi molekulami UF_6 a H_2 dodávají izotopům $^{238}\text{UF}_6$ a $^{235}\text{UF}_6$ jiné zrychlení kvůli rozdílu ve váze, čehož tato metoda také využívá a zvyšuje tak separační poměry trysky [18].

Je ekonomicky velmi výhodné použít dvě trysky velmi krátce za sebou, ochuzený proud se vžene do další trysky a dojde tak k sekundární separaci. Druhotný obohacený proud se vrací do obohacovacího procesu a zvyšuje se tak účinnost (Obr. 30).



Obr. 30 Schéma duální trysky [18]

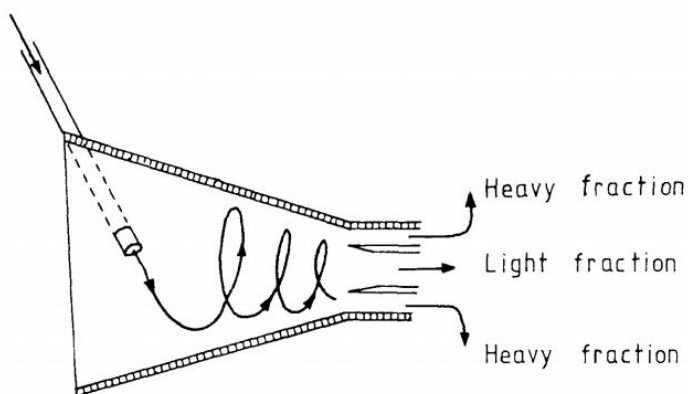
Jednotlivé trysky se vyrábí z tenkých kovových plechů, ze kterých se laserem, nebo vodním paprskem vytvoří potřebný tvar, větší množství fólií se poté položí na sebe a zajistí do konstrukce a tvoří tak jednu trysku (Příloha obr. 19). Jeden separační modul je ale kromě velkého množství trysek tvořen také kompresory, chladiči a ventily, rozměrově je válcového tvaru s průměrem asi 2m a 10m na výšku (Obr. 31).



Obr. 31 Schéma separačního stroje používající trysky [15]

Vírová metoda Helicon

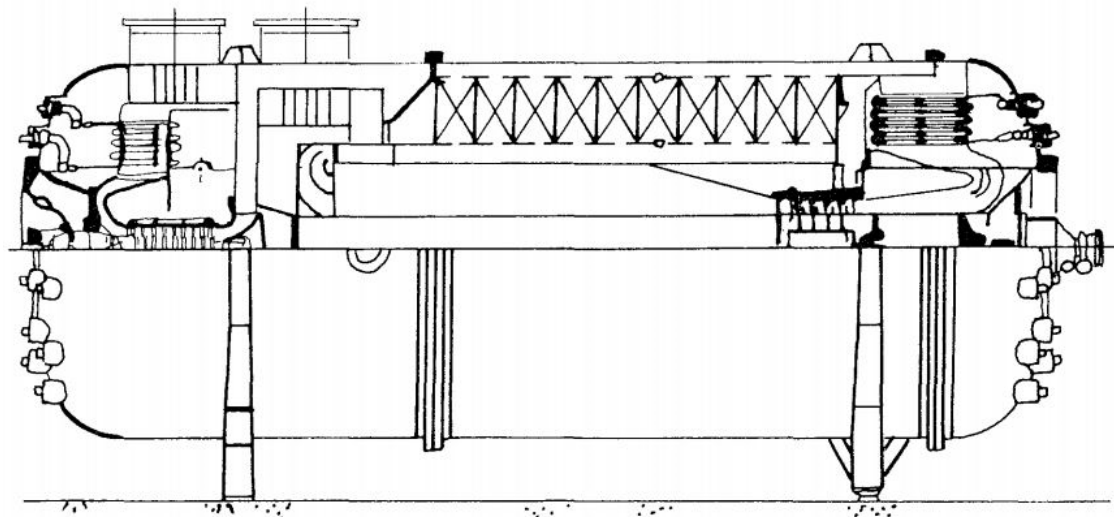
Směs 1-2% UF_6 a 98-99% H_2 je tangenciálně vháněna velkou rychlostí do kónické komory, kde spolu s mírným axiálním prouděním vytváří vír. K separaci izotopů se opět používá tlaková difuze – těžší molekuly $^{238}\text{UF}_6$ jsou koncentrovány blíže k vnitřnímu povrchu komory a lehčí $^{235}\text{UF}_6$ je koncentrováno blíže ke středu. Na konci komory jsou rozdělovače, které rozdělují směs na obohacený a ochuzený proud.



Obr. 32 Vírová separace [18]

Na rozdíl od tryskové metody má vírová metoda velmi velké objemové průtoky a malý separační poměr, Africká společnost UCOR uvádí separační poměr 1,03. Tohoto separačního poměru ale dosáhli při použití devatenácti různých proudů směsí, každá s různou úrovní obohacení. Tlakovat a chladit

tak velký počet různých směsí je konstrukčně velmi velký problém, za normálních podmínek by bylo pro každý proud potřeba jeden kompresor a chladič. Společnost UCOR vyvinula proto speciální metodu, kterou jsou schopni tlakovat směsi jedním velkým axiálním kompresorem (Příloha obr. 18) bez smíchání jednotlivých směsí. Tímto byli schopni omezit počet potřebné techniky, zvýšit účinnost a separační poměry a umožnit tak průmyslové nasazení této metody. [18]



Obr. 33 Modul na vírovou separaci Helicon [18]

Jednotlivé moduly použité v Africe jsou válcového tvaru s průměrem 3,6m a délkou 10m, obsahují dvě axiální čerpadla, chladiče a velké množství vírových komor, kde dochází k samotné separaci. Jeden modul má separační výkon asi 10t SWU/rok a náklady asi 3000-3500kWh/SWU. [20]

7.3 Ekonomická rozvaha

Aerodynamické procesy, podobně jako separace plynou difúzí, potřebují velké množství trubek pro vedení plynu, kompresorů a chladičů pro svou funkci. Celý systém je mechanicky komplikovaný, vyžaduje hodně údržby a velké množství elektrické energie na provoz, uvádí se 3000-3500kWh/SWU.[20]

Na průmyslovém měřítku se používají pouze v severní Africe a Brazílii a v porovnání s plynou difúzí, nebo centrifugální separací, jsou obohacovací komplexy v provozu velmi malých celkových výkonů.

Jejich jedinou výhodou je jednoduchá konstrukce separačních komponentů.

8 Pokročilé metody separace

8.1 Separace excitací atomových par laserem (AVLIS – Atomic vapor laser isotope separation)

8.1.1 Historie

Teoretické základy pro tuto metodu byly položeny asi v 70. letech 20. století, ale nedostatek technologických znalostí a velké technologické nároky nedovolily v té době provádět experimenty s dobrými výsledky.

V dnešní době se s touto metodou experimentuje a stále se pracuje na jejím využití jako moderní způsob obohacování uranu s nízkými operačními náklady.

8.1.2 Princip

V anglickém jazyce se tato metoda označuje jako AVLIS - Atomic vapor laser isotope separation, v doslovném překladu jde tedy o separaci izotopů pomocí excitace atomové páry laserem.

Excitace je proces, při kterém atom přijme foton o určité vlnové délce a energii a zvýší tak svou energii. Rozsah energií, kterou může atom přijmout je pevně dán a záleží na hmotnosti atomového jádra, proto je pro ^{235}U a ^{238}U mírně odlišná. Rozdíl vlnových délek, které mohou izotopy přijímat je asi 10pm ($1 \cdot 10^{-11}\text{m}$). Pokud jsou atomové páry, směs par ^{235}U a ^{238}U , bombardovány proudem fotonů z laseru o velmi přesné vlnové délce můžeme dosáhnout excitace pouze jednoho izotopu. Rozdíl ve frekvenci fotonu je ale naprosto minimální a laser musí být tedy přesně nastaven a produkovat velké množství fotonů s velmi přesnou vlnovou délkou. Právě toto je největším problémem při vývoji této metody.

Pokud atom pohltí elektron přesně dané energie, snaží se kompenzovat nově získanou energii a při tomto procesu se z jeho elektronového obalu vyloučí jeden elektron. Z atomu se tedy stává iont s kladným elektrickým nábojem a na venek přestává být elektricky neutrální a je tedy možnost jej elektrostaticky separovat z páry.

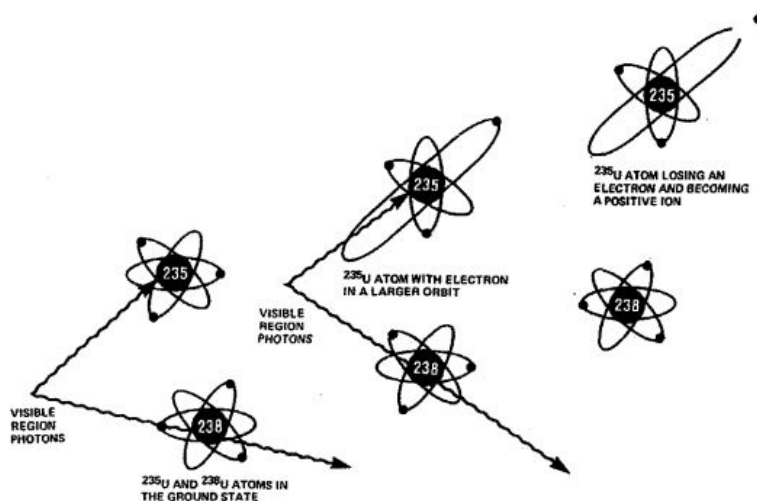
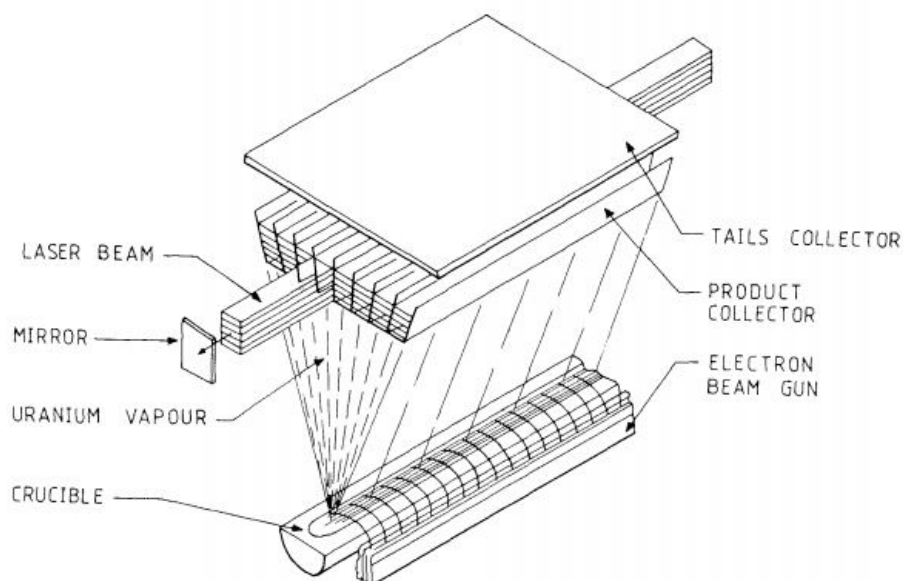


Fig. 12. Atomic vapor laser isotope separation process.

Obr. 34 Schéma procesu excitace uranových atomů [17]

Pokud tedy bombardujeme uranové páry proudem fotonů o velmi přesně dané vlnové délce je možnost elektricky nabít ionty ^{235}U a ty poté pomocí elektrostatického separátoru zachytávat, dostáváme tak obohacený produkt na elektrodě statického odlučovače a proud par se sníženým obsahem izotopů ^{235}U .

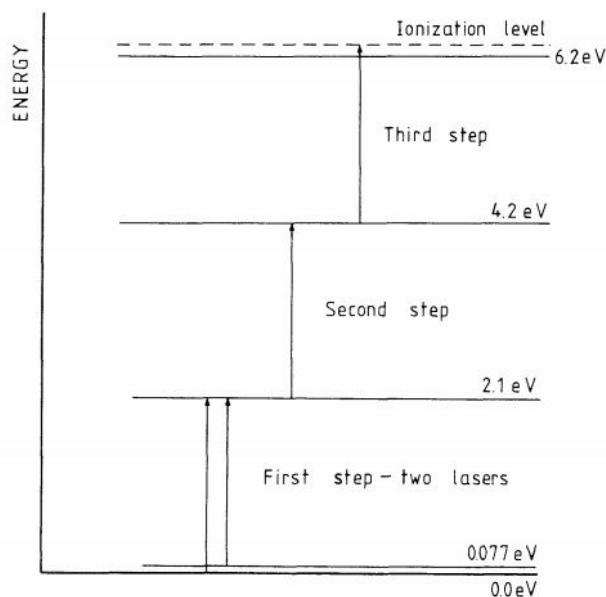


Obr. 35 Schéma modulu metody AVLIS [18]

Celkový modul je asi metr vysoký a na délku může mít až tři metry, skládá se z ingotu uranu, elektronového zdroje a cívky vytvářející magnetické pole ve spodní části a soustavy laserů, zrcadel a elektrostatických odlučovačů ve vrchní části.

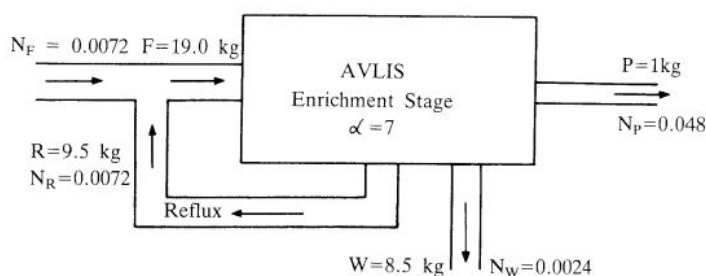
Uranový ingot je zahříván a odpařován pomocí silného bombardování elektrony, uranové páry poté stoupají do vrchní části modulu, jelikož jsou uranové páry velmi korozivní, je nutno použít korozivzdorný materiál pro konstrukci obalu modulu. Asi 50% atomových par ale desublimuje na stěnách a je nutno tento materiál recyklovat do nových ingotů. Pára, která se dostane až do horní komory, je poté ozářena čtyřmi sady laserů v komoře zevnitř obalenou zrcadly sloužící k odrazení proudu fotonů zpět do par. Celkem je proud fotonů v komoře odražen asi až 300 krát, aby se využil veškerý potenciál.

Důvodem pro použití čtyř sad laserů je fakt, že je lehčí přesně nastavit frekvenci produkovaných fotonů u laserů nižšího výkonu. Celkový proces ionizace je rozdělen do třech kroků, v prvním kroku se energie atomu zvýší na 2,1eV, ve druhé fázi na 4,2eV a v konečné třetí fázi dochází k excitaci elektronu a vzniku iontu na energii 6,2eV. Důvodem pro použití čtyř laserů je fakt, že asi 30% atomů vstupujících do laserové komory se již odpařením posunula na energetickou hladinu 0,077eV, proces je znázorněn na Obr. 36. Celkem je ionizováno asi 70% atomů ^{235}U , zbytek není dostatečně ozářen a je součástí ochuzeného výstupu.



Obr. 36 Excitační schéma [18]

Ionizované atomy ^{235}U jsou poté silným elektromagnetickým polem urychleny na kolektory, kde se usazují. Kolektory jsou orientovány paralelně s proudem fotonů a v ideálním případě se na nich usazují jen ionty ^{235}U . V praxi ale dochází k usazování i asi 3-15% elektricky neutrálních par.



Obr. 37 Příklad separace modulem AVLIS [11]

Teoreticky lze v jednom modulu dosáhnout separačního poměru až 15, v praxi se ale separační faktor pohybuje v rozmezí 5 až 10. V porovnání s plynou difúzí, nebo centrifugou se jedná o velmi vysoké obohacení. Jedním průchodem je totiž možnost obohatit uran až na hranici 3% pro použití v energetických jaderných reaktorech, což dává velmi dobré možnosti pro produkci paliva do těchto reaktorů.

Největším konstrukčním problémem jsou lasery na excitaci a ionizaci uranové páry, ty musí mít dostatečný výkon, řádově až desítky kW/cm^2 . Tak velkého výkonu je potřeba díky velmi krátkému vystavení atomů uranu v páře proudu fotonů, pokud uvažujeme výšku excitační zóny 5cm a rychlost atomu uranu 500ms^{-1} , musí k excitaci dojít do 10^{-4}s . Protože je velkým konstrukčním problémem vytvořit laser, který bude produkovat proud fotonů velmi přesné vlnové délky a vysokého výkonu používá se víc laserů. Celkem je v jednom modulu použito asi 20 sad po čtyřech laserech, čili celkem asi 80 laserů.

8.1.3 Ekonomická rozvaha

I přes poměrně velké množství uranu, který se usadí na stěnách komory, nebo není ionizováno, se jedná o energeticky nenáročný proces. Energie potřebná na napájení laserů se odhaduje na 2kWh/ SWU, pokud se zahrne i energie potřebná na odpařování uranu a další operace tak se odhaduje energetická náročnost na 100 kWh/ SWU. [20]. Jiný zdroj uvádí energetickou náročnost až v rozmezí 10-50 kWh/ SWU [18].

Největším problémem této metody jsou technologické požadavky na lasery, i když energie k provozu se zdá být velmi příznivá, pořizovací náklady a technická náročnost této metody je největším problémem a důvodem pomalého vývoje.

8.2 Separace laserovou excitací molekul (MLIS – Molecule laser isotope separation)

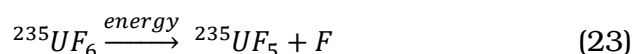
8.2.1 Historie

Tento typ separace pomocí laseru byl poprvé navržen v 70. letech 20. století, ale kvůli velkým technologickým požadavkům na lasery a jejich kalibrace na velmi přesnou frekvenci ještě nebyla použita ve větším měřítku, pouze v laboratorních experimentech.

V dnešní době je tento separační princip zkoumaný ve velké míře a do jeho výzkumu proudí obrovský kapitál. Někteří věří, že je to metoda budoucnosti pro obohacování uranu na průmyslovém měřítku a za čas nahradí dnešní difúzní a centrifugální závody na obohacování uranu.

8.2.2 Princip

Doslova přeložená zkratka MLIS - Molecule laser isotope separation znamená separace molekul izotopů pomocí laseru. Uran ve formě UF_6 je ozařován silným laserem, který produkuje silný proud fotonů o přesně dané vlnové délce, frekvenci a energii. Molekuly $^{235}UF_6$ a $^{238}UF_6$ jsou schopny pohltit foton o dané vlnové délce a podniknout chemickou reakci, pro každou molekulu izotopu je tato frekvence závislá na hmotnosti molekuly UF_6 a je tedy pro každou izotopovou molekulu jiná. Pokud je frekvence fotonu správná, molekula $^{235}UF_6$ jej pohltí a proběhne chemická reakce (13), princip je znázorněn na *Obr. 38*.



Vzniklé molekuly $^{235}UF_5$ ztrátou jednoho atomu fluoru výrazně mění chemické vlastnosti a rychle desublimují v jemný bílý prášek, který je poté jednoduše filtrovatelný z plynu UF_6 .

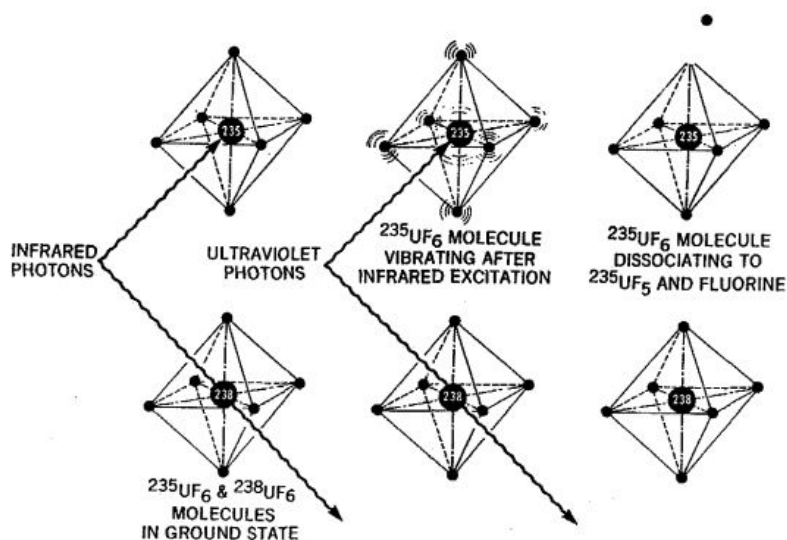
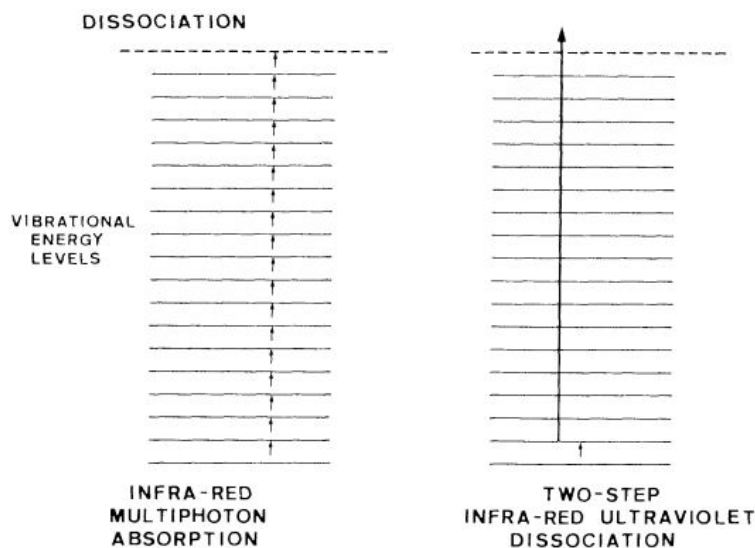


Fig. 13. Molecular laser isotope separation process.

Obr. 38 Schéma principu metody MLIS [17]

Molekula plynu $^{235}\text{UF}_6$ je přivedena do nestabilního stavu pomocí bombardování protony. To se může stát několika způsoby, buďto pohlcením většího množství fotonů ultrafialového laseru (levá část Obr. 39), nebo pohlcením jednoho fotonu z ultrafialového laseru a jednoho fotonu infračerveného laseru s větší energií (pravá část Obr. 39). Tímto způsobem přijatá energie z fotonů vede k chemické reakci (23) a ztrátě jednoho atomu flóru.

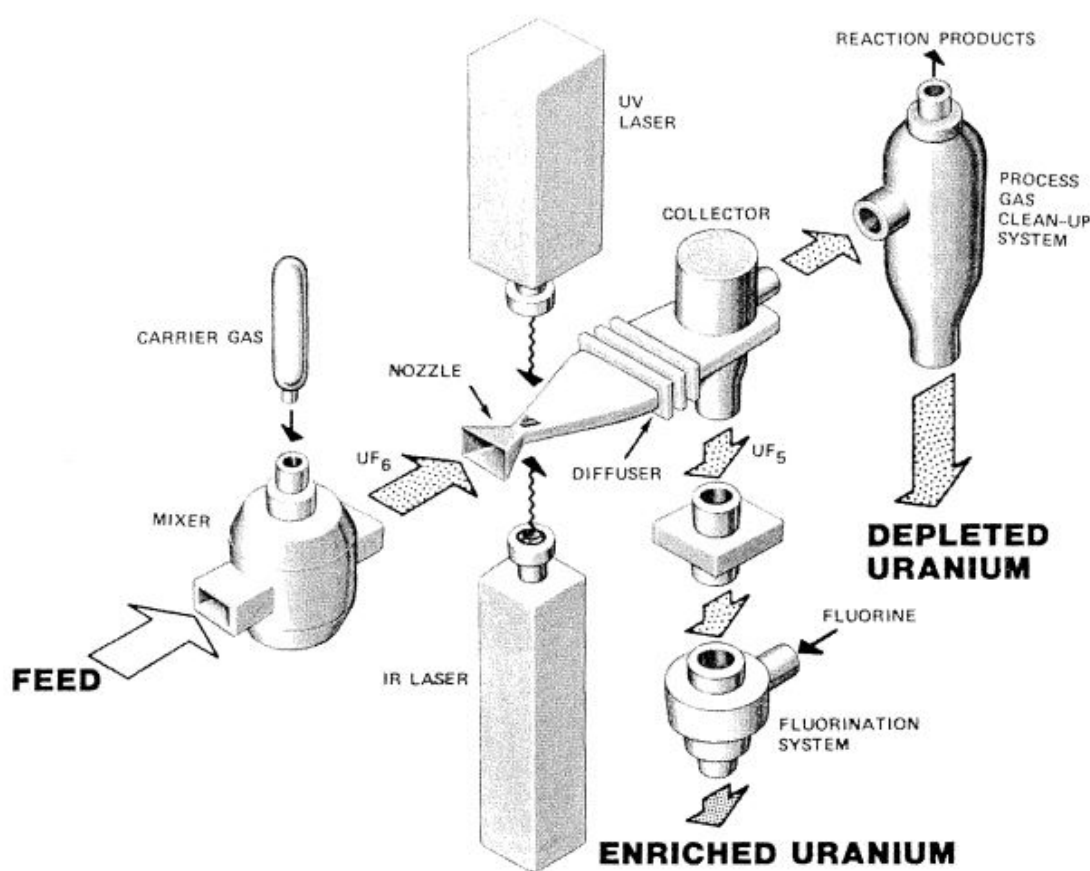


Obr. 39 Schéma dodávky energie molekule [11]

Pro tvorbu fotonů se používá CO_2 , CF_4 laserů, nebo speciálního laseru na bázi volných elektronů (Příloha obr. 20), který je nyní ve vývoji a slibuje se od něj velké množství využití i mimo metody MLIS a AVLIS. Princip založený na dvojici ultrafialových a infračervených laserů je zkoumán pouze v laboratořích Los Alamos USA a za posledních několik roků se nepodařilo vyřešit zásadní problémy a zdá se, že bude projekt ukončen a celý systém MLIS bude spoléhat jen na infračervené lasery. Hlavním problémem dvojice laserů UF a IČ je malá šance pohlcení fotonu v ultrafialovém spektru

molekulou, což by znamenalo použití velmi silných laserů, které je nepraktické a takové lasery je těžké nastavit na přesně požadovanou vlnovou délku.

Hlavním problémem, se kterým se vědci u vývoje systému MLIS museli vypořádat, bylo sdílení energie molekul $^{235}\text{UF}_6$ dodané fotony s molekulami $^{238}\text{UF}_6$ v důsledku srážek molekul v plynu. Za normální teploty, kde je UF_6 v plynném stavu je množství srážek tak velké, že se energie dodaná laserem předávala všem molekulám v plynu a k požadované změně chemického složení molekul $^{235}\text{UF}_6$ docházelo jen v minimální míře. Problém byl vyřešen smícháním UF_6 s nosným plynem, podobně jako u aerodynamických procesů. V tomto případě se jako nosný plyn používá dusík, nebo argon. Směs jednoho z těchto plynů a UF_6 je poté velkou rychlostí vháněna do dýzy, kde směs plynů expanduje a rapidně se ochlazuje. Ochlazením plynu se sníží počet srážek mezi molekulami plynu v důsledku snížení relativní molekulové rychlosti. Menší množství srážek mezi molekulami a menší přenosy energie poté dovoluje excitovat jen molekuly $^{235}\text{UF}_6$.



Obr. 40 Schéma modulu MLIS [18]

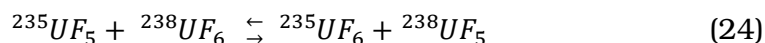
Schéma zobrazuje v Los Alamos vyvíjený typ obohacovacího MLIS modulu využívající infračervený a ultrafialový laser. V dnešní době více vyvíjený typ modulu pouze s infračerveným laserem se od tohoto moc neliší, pouze se v jeho konstrukci nenachází ultrafialový laser ve vrchní části schématu.

Vstupující UF_6 je smíchán s nosným plynem a putuje do dýzy, kde se chladí v důsledku prudké expanze a je následně ozářen silným laserem, to vede k změně chemického složení molekul $^{235}\text{UF}_6$ na $^{235}\text{UF}_5$ a rychlé

desublimaci ve sběrné komoře. Nezměněný $^{238}\text{UF}_6$ a malá část $^{235}\text{UF}_6$ pokračuje dále jako ochuzený proud.

Protože MLIS používá UF_6 a jeho produkt - obohacený UF_5 může být velmi snadno přeměněn zpět na UF_6 , je možnost tyto zařízení skládat do kaskád a zajistit tak velmi ekonomické obohacování uranu na prakticky libovolnou úroveň. To je výhoda hlavně s nutností použití laserů, které se se zvyšujícím výkonem stávají velmi těžce regulovatelné s ohledem na potřebu produkovat fotony o velmi přesné vlnové délce.

Jedním z faktorů, který omezuje u této metody separační poměr je chemická reakce mezi $^{235}\text{UF}_5$ a $^{238}\text{UF}_6$, která se odehrává v okamžiku po ozáření plynu a před desublimací $^{235}\text{UF}_5$. Tuto chemickou reakci popisuje rovnice (12).



Když se molekula $^{235}\text{UF}_5$ srazí s $^{238}\text{UF}_6$ vznikne $^{238}\text{UF}_5$, který začne také kondenzovat a způsobuje tak nežádoucí ^{238}U v obohaceném výstupu. Můžeme předpokládat, že srážky molekul vedoucí k této chemické změně jsou méně časté, než kondenzace molekul $^{235}\text{UF}_5$. Bohužel ale nejsou žádné dostupné data, které by popisovaly separační poměr MLIS modulu. Dá se ale předpokládat, že bude velmi podobný s moduly AVLIS, tedy asi v rozmezí 5-10. Kdyby se tento předpoklad nenaplnil, je možnost zapojit moduly MLIS do kaskády a dosáhnout tak v podstatě libovolného obohacení díky možnosti přeměny UF_5 na UF_6 . [18]

8.2.3 Ekonomická rozvaha

Stejně jako u metody AVLIS nejde ještě odhadnout přesné ekonomické parametry této metody. Dosud funguje jen v laboratorních experimentálních procesech, ale stávající výsledky této metody ukazují, že se jedná o technologicky velmi náročnou metodu s velkým obohacovacím poměrem a malou energetickou náročností. Energetická náročnost se uvádí podobná, jako u systému AVLIS, tedy asi 100 kWh/ SWU. [20]. Jiný zdroj uvádí energetickou náročnost v rozmezí 10-50 kWh/ SWU [18].

Největším konstrukčním problémem této metody je konstrukce dostatečně silného laseru s přesnou vlnovou délkou. Tento problém ale není tak znatelný, pokud totiž dojde k neozaření částí $^{235}\text{UF}_6$ může se plyn ozářit znovu v následujícím modulu kaskády.

8.3 Porovnání problémů metody AVLIS a MLIS

Hlavním rozdílem je forma uranu, která vstupuje do obohacovacího procesu, u systému AVLIS se používá páry uranu, která je toxičtější a daleko více korozivní, než UF_6 používané v MLIS a usazuje se na stěnách komory. To vede k nutnosti periodického čištění a recyklace uranu. V tomto ohledu má MLIS velkou výhodu, s UF_6 již byly vyvinuty velmi efektivní a bezpečné metody manipulace. Navíc použití uranu ve formě UF_6 dovoluje moduly MLIS skládat do kaskády a ochuzený výstupní proud poslat do dalšího modulu k podstoupení dalšího separačního procesu. U systému AVLIS je nutno

konstruovat elektrostatické odlučovače a výsledný produkt je čistý kovový Uran, který jde přetavit do formy ingotu a použít v dalším stroji.

V porovnání s ohledem na lasery je nutnost v metodě AVLIS použít až čtyři sady laserů, ale celkové množství ozářeného materiálu je menší a čistý uran má mírně větší rozsah vlnových délek, které může absorbovat.

Kvůli nedostatku informací a skutečnosti, že obě metody jsou ještě ve fázi vývoje a výzkumu nelze označit jednu metodu jako lepší, obě jsou velmi perspektivní a nabízejí velké zefektivnění obohacovacího procesu v porovnání s dnes používanou difúzí, nebo centrifugální separací.

Obě metody, MLIS i AVLIS jdou použít i na separaci izotopů plutonia, u metody AVLIS je v čisté kovové formě, u MLIS ve formě PuF_6 , které má velmi podobné vlastnosti jako UF_6 . ^{239}Pu pro použití v atomových zbraních, nebo množivých reaktorech (FBR), se separuje z vyhořelého paliva pro energetické reaktory ze směsi izotopů ^{238}Pu , ^{239}Pu a ^{240}Pu . Na rozdíl od práce s uranem je u plutonia potřeba regulace množství při separačním procesu, aby nedošlo k překročení kritické hmotnosti. U plutonia se musí také počítat s větším radiačním rizikem, nežli u uranu.

8.4 Separace plasmy rezonancí v cyklotronu

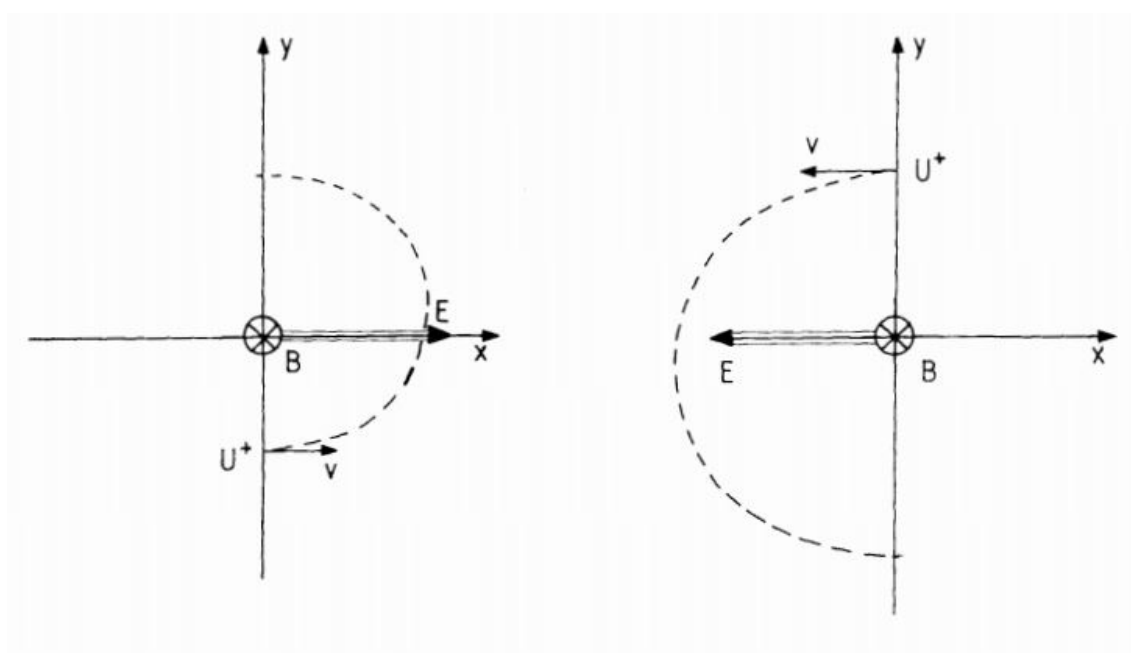
8.4.1 Historie

Jedna z nejnovějších metod separace izotopů uranu, nyní zkoumána v USA, ale pravděpodobně i v dalších zemích.

8.4.2 Princip

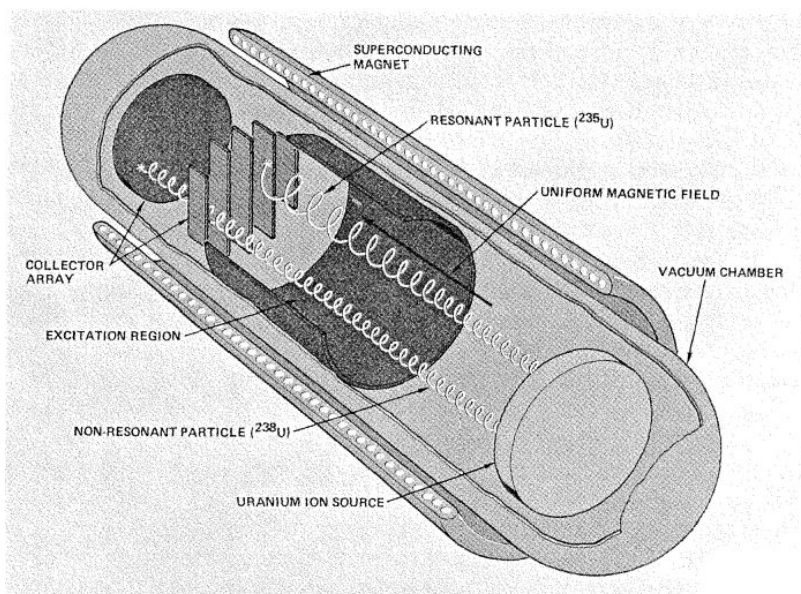
Metoda využívá rezonančního principu podobně jako cyklotron – na částici působí měnící se magnetické pole o frekvenci, která je rovna rezonanční frekvenci částice a zvyšuje tak její energii a rychlost. Kvůli hmotnosti atomových jader izotopů uranu mají jednotlivé izotopy i jiné rezonanční frekvence, čehož tato metoda využívá. Při použití elektromagnetu s intenzitou elektromagnetického pole 2 T je rezonanční frekvence izotopu 130 kHz a rozdíl rezonančních frekvencí izotopů je 1,65 kHz, čili asi 1,25 %. Což je dostatečný rozdíl, který jde využít k obohacování uranu.

Protože jsou ale izotopy uranu v klasických podmínkách navenek elektricky neutrální a nedaly by se ovlivnit magnetickým polem, vytvoří se z čistého uranu plasma. Ta je vytvářena buďto pomocí silného elektrického výboje, nebo zařízením zvaným Q-machine. Plasma je dále vedena axiálně uvnitř solenoidu ze supravodivých magnetů, které vytvářejí již zmíněné magnetické pole o intenzitě 2T. Elektromagnetem prochází elektrický proud o rezonanční frekvenci iontu a vytváří rezonanční magnetické pole, které urychluje oba ionty uranu – $^{235}\text{U}^+$ i $^{238}\text{U}^+$, ale díky rezonanční frekvenci jsou účinky na iont $^{235}\text{U}^+$ mnohem větší. Proces je naznačen na Obr. 41.

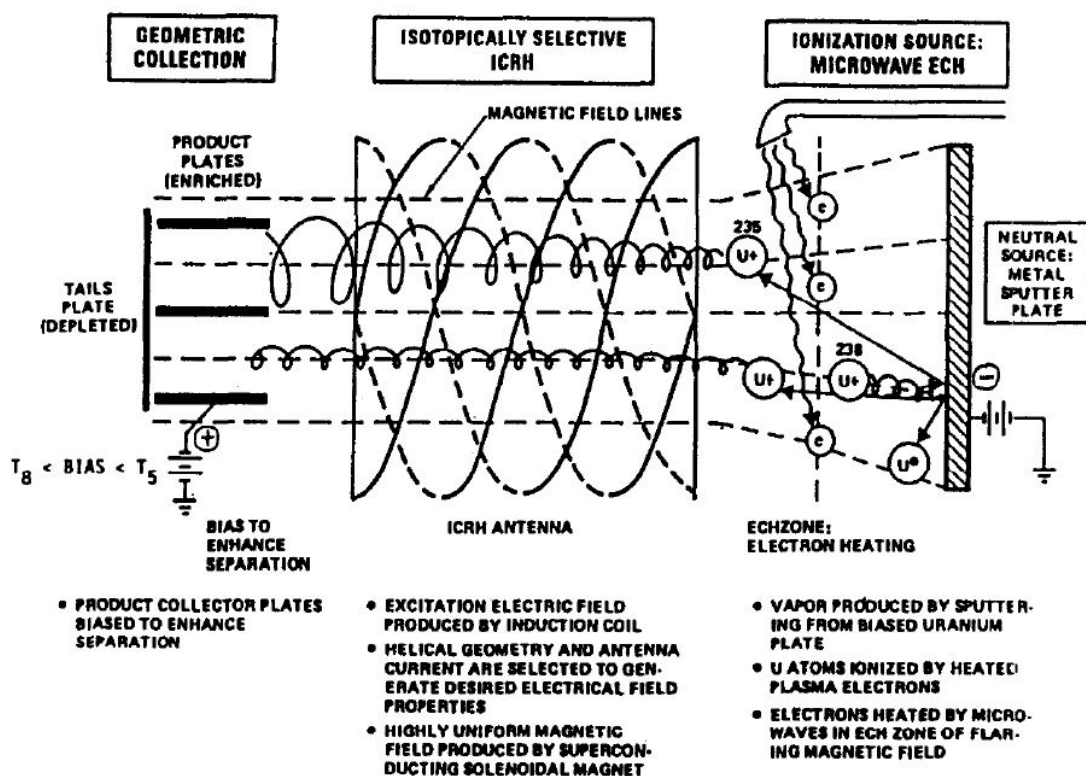


Obr. 41 Silové působení na iont plazmy ^{235}U [18]

V důsledku změny smyslu elektrického proudu v elektromagnetu o frekvenci rezonance iontu izotopu $^{235}\text{U}^+$ se poloměr jeho rotačního pohybu zvětšuje. Tohoto využívá modul určený k separaci plasmy pomocí rezonance.



Obr. 42 Schéma modulu využívajícího separaci rezonancí plazmy [11]



Obr. 43 Princip rezonance plazmy [10]

Díky změně elektromagnetického pole o frekvenci, jako je rezonanční frekvence $^{235}\text{U}^+$, se trajektorie těchto iontů mění do šroubovice se zvětšující se poloměrem. Tím dochází k dopadu $^{235}\text{U}^+$ na desky umístěny paralelně ke směru iontu. Desky jsou od sebe záměrně umístěny v dostatečné vzdálenosti, aby na ně dopadalo minimum iontů $^{238}\text{U}^+$ a maximum iontů $^{235}\text{U}^+$.

Toroid je 1m dlouhý, aby izotopy mohly dokončit alespoň 80 rotací a získat dostatečný rozdíl průměrů rotačních trajektorií a docházelo k dostatečné separaci izotopů. Frekvence rotačního pohybu je 130 kHz, tedy perioda je 7,7 μs a axiální rychlost iontu je až 1600 ms^{-1} , zároveň teplota plazmatu dosahuje až 75 000K. Silné magnetické pole ji udržuje ve středu toroidu, ale i tak je třeba vnitřní stěny tepelně izolovat materiálem, který takové zatížení vydrží. Další z tepelných nároků je na supravodivé magnety, které se pro svou správnou funkci musí držet na velmi nízké teplotě, toho se dosahuje chlazením vodičů kapalným héliem.[11]

Aby nedocházelo ke kolizi iontů, která by poškodila rezonanční proces a zabránila separaci iontů, nesmí hustota iontů v plazmatu uvnitř proudu přesáhnout 10^{12} cm^{-3} . Celkem jde tedy ve stroji vytvořit proud částic o hodnotě $10^{17} \text{ iontů cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Vědci nyní experimentují s toroidy o průměru 3,8m s plánovaným výkonem jedné tuny U^{235} za rok, tedy dostatek na výrobu 30t reaktorového paliva s obohacením 3-3,5%. [10]

8.4.3 Ekonomická rozvaha

Obdobně jako dvě předešlé metody je i tato ve fázi výzkumu, vývoje a testování, nejvíce asi v USA v programu Advanced Isotope Separation (AIS) a plasma separation proces (PSP).

V budoucnu se s touto metodou počítá při použití na separaci zbytkového uranu v ochuzených „odpadních“ proudech z centrifugální

separace a plynné difuze. Teoreticky je možné touto metodou obohatit uran z 0,2% na přírodní úroveň 0,71% za menší cenu, než je pořizovací cena uranu s přírodní koncentrací.

I přes cenu SWU, která se odhaduje v rozmezí 100-300 kWh/SWU je tato metoda možnou cestou pro obohacování uranu v budoucnu. [20]

Její hlavní výhodou je, že nepotřebuje konstrukčně a technologicky velmi náročné lasery jako AVLIS nebo MLIS a je tedy o něco jednodušší na zvládnutí. Její nevýhodou je větší energetická náročnost na obohacení, než tyto metody, hlavně kvůli nutnosti tvoření plazmatu a potřebě chladit supravodiče v magnetech.

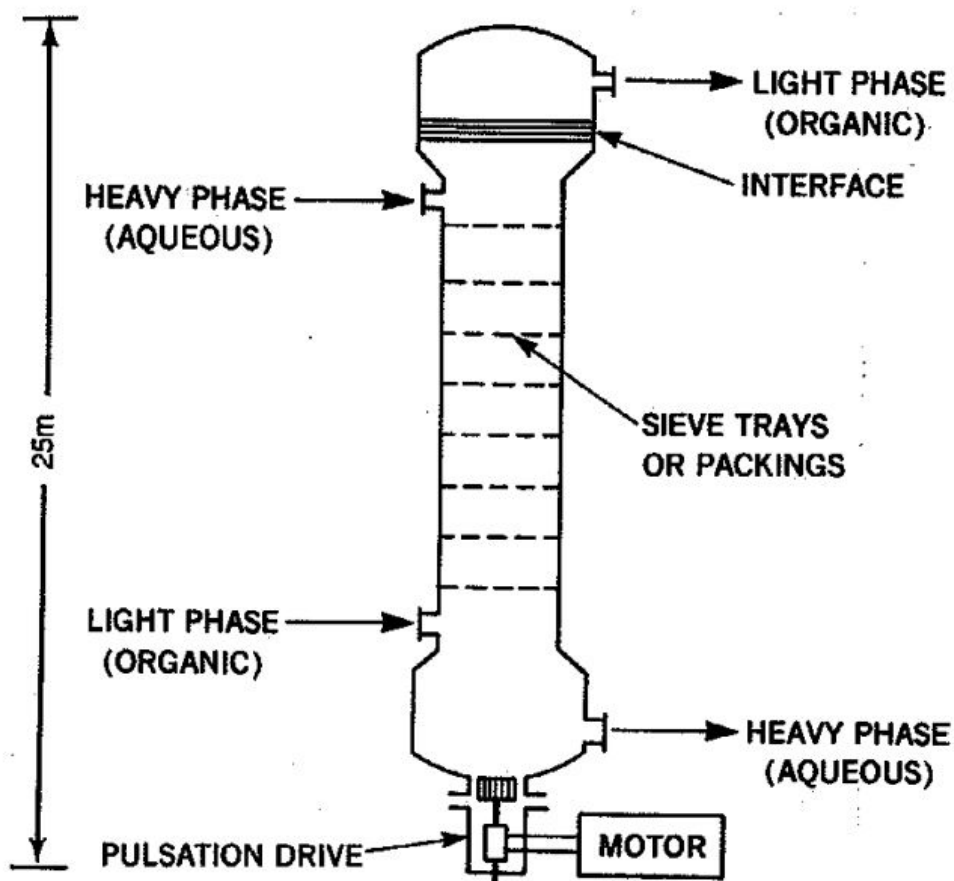
8.5 Chemická separace CHEMEX

8.5.1 Historie

Nyní ve vývoji Francouzskou společností CEA, zatím jen v laboratorním testování a vývoji, metoda je nazvána CHEMEX.

8.5.2 Princip

Využívá Uranu rozpuštěného ve vodním a organickém roztoku, isotop ^{235}U preferuje oxidační číslo IV a koncentruje se tak v organickém roztoku (organic v Obr. 44) ve formě $^{235}\text{U}^{\text{IV}}$. Isotop ^{238}U preferuje oxidační stav III a je více koncentrován ve formě $^{238}\text{U}^{\text{III}}$ ve vodním roztoku (aqueous v Obr. 44). Pomocí velkého množství opakování této operace a mezifázových chemických reakcí jde vytvořit ochuzený a obohacený produkt jako u ostatních metod.



Obr. 44 Modul na chemickou separaci CHEMEX [17]

8.5.3 Ekonomická rozvaha

Metoda využívá velmi jednoduchých zařízení, která nejsou technologicky náročná, je možné je využít v budoucnu, zvláště v méně vyvinutých zemích. Dosahují ale velmi malých separačních poměrů a musí pracovat s velkým množstvím materiálu, jsou tedy komerčně nezajímavé a jen se s nimi experimentuje.

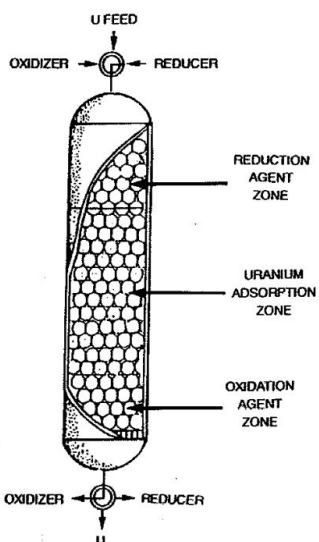
8.6 Chemická separace ASAHI

8.6.1 Historie

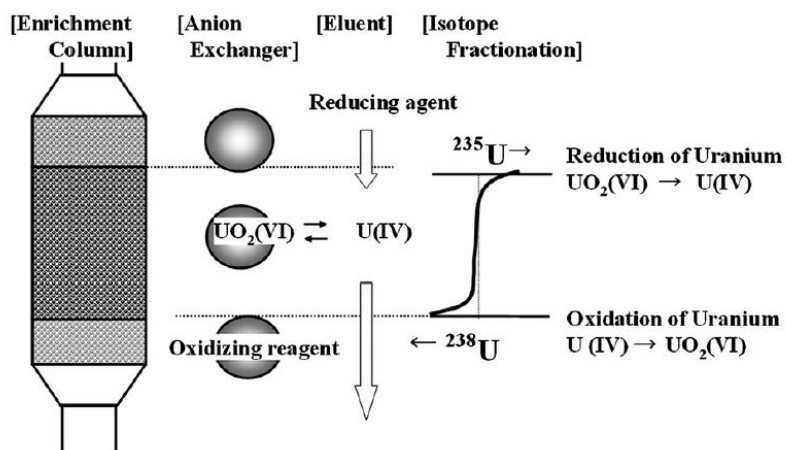
Vyvíjen společností Asahi Chemical Company v Japonsku, zatím pouze ve fázi vývoje podobně jako CHEMEX.

8.6.2 Princip

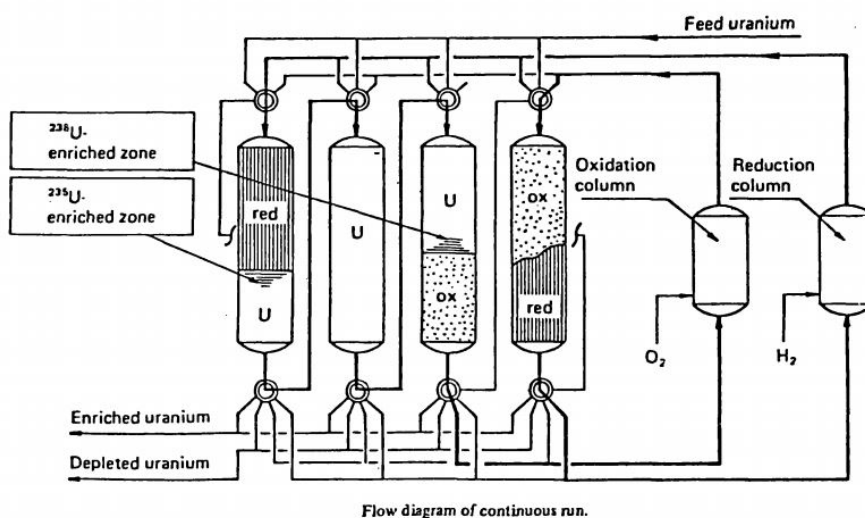
Principiálně obdobný jako CHEMEX, využívá oxidační stavy U^{IV} a U^{VI} ve velkých válcových kolonách naplněných koulemi ze speciální pryskyřice umožňující výměnu iontů v roztoku.



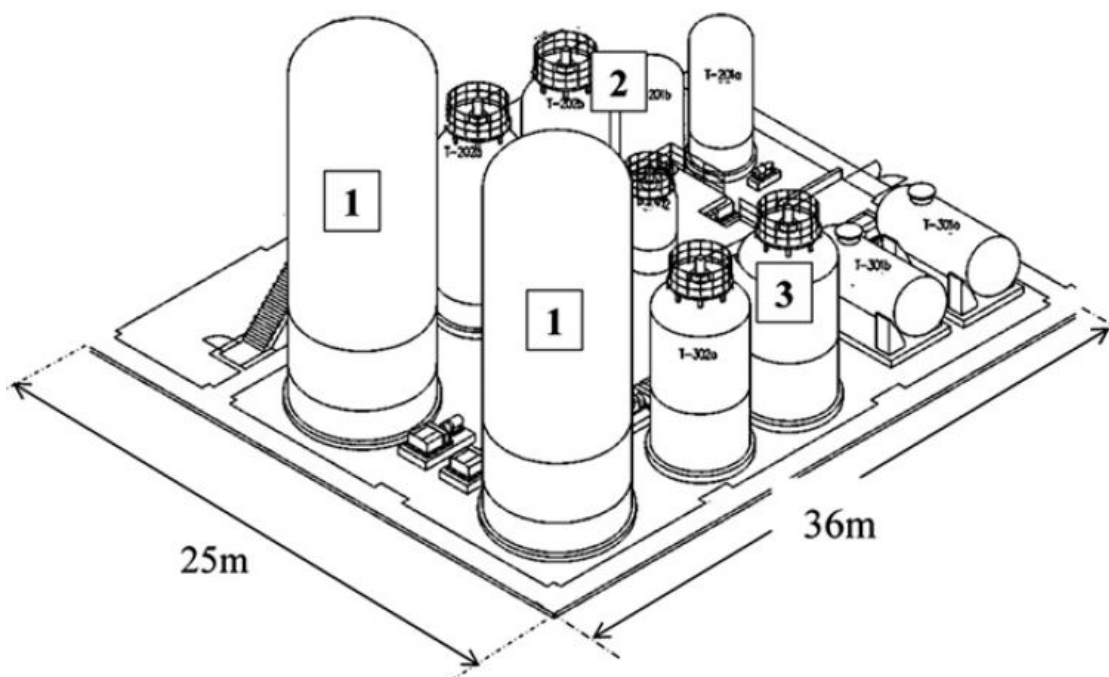
Obr. 45 Schéma modulu chemické separace ASahi [17]



Obr. 46 Schéma principu ASahi [10]



Obr. 47 Zapojení kaskády metody ASahi [10]



Obr. 48 Schéma modulu ASAHI s výkonem 200tSWU/rok [17]
1 – obohacovací kolony; 2- oxidační zařízení; 3 – redukční zařízení

8.6.3 Ekonomická rozvaha

Principem jednoduchý proces, který nepotřebuje technologicky a konstrukčně složité zařízení, ale malý separační faktor a práce s velkým množstvím materiálu zaráz tuto metodu činí ekonomicky nezajímavou.

Schéma obohacovacího zařízení s kapacitou 1400 tSWU/rok je znázorněno v Příloha obr. 23.

9 Celková ekonomická rozvaha

V dnešní době existuje velké množství separačních procesů. V obohacovacím procesu na průmyslové úrovni se používala v nedávné době zejména plynná difuze, která je nyní vytlačována energeticky méně náročnou centrifugální separací.

Table 2. Uranium enrichment processes

Based on	Examples
Diffusion in a pressure gradient	Gas centrifuge ^a Separation nozzle Vortex tube
Diffusion principles	Gaseous diffusion ^a Mass diffusion Thermal diffusion
Phase equilibrium principles	Distillation
Chemical equilibrium principles	Chemical exchange Ion exchange
Photo excitation principles	Atomic vapor laser isotope separation (AVLIS) Molecular laser isotope separation (MLIS)
Electromagnetic principles	Plasma separation process (PSP) Electromagnetic isotope separation (EMIS) Plasma centrifuge

^aProcess of current interest.

Obr. 49 Shrnutí obohacovacích metod [17]

Process	Working material	Single-stage separation factor ($q=1+g$)	Stage cut ($\theta = P/F$)	Stage hold-up time (s)	Specific energy consumption (kWh/SWU)	Stage reflux mechanism	Status of technique
Gaseous diffusion	UF ₆	1.0040–1.0045	1/2	5–10	2 300–3 000	None	Mature
Centrifuge	UF ₆	1.3–1.6	~1/2	10–15	100–300	Internal countercurrent flow	Mature
Aerodynamic Nozzle	0.04UF ₆ + 0.96H ₂	1.015 ^a	1/4	~2	3 000–3 500	Recycle intermediate fraction	Demonstration
Helikon	0.01–0.02UF ₆ + 0.98 – 0.99H ₂	1.025–1.030 ^a	1/20	0.05–0.2	3 000–3 500	None	Demonstration–Production
Chemical Solvent extraction	Aqueous and organic solutions of U compounds	1.0025–1.0030	1/2	20–30	≤600	Chemical conversions U(IV)⇌U(VI)	Pilot plant
Ion exchange	Aqueous U solution and ion-exchange resin	1.0013	1/2	~1	(400–700) ^b	Chemical conversions U(IV)⇌U(VI)	Pilot plant
Laser Molecular	UF ₆ -N ₂	(5–15) ^{c,d}	NA	NA	10–50	None	R&D
Atomic	U vapour	5–15 ^d	NA	NA	10–50	Recover and recycle U metal	R&D
Electro-magnetic Calutron	UCl ₄ ^e	20–40 ^d	NA	NA	3 000–4 000	Recover and recycle UCl ₄	Probably unsuitable for large quantities
Ion cyclotron resonance	U plasma	3.5–10 ^d	NA	NA	200–600	Recover and recycle U metal	R&D

^a In order to use these values in table 5.1, the value of g given here should be multiplied by twice the value of the stage cut.

^b Estimate based on rough comparison with solvent extraction method.

^c Estimate based on rough analogy with AVLIS method.

^d The value entered for the last four techniques is the enrichment factor α (see equations 5.7) rather than the separation factor g .

^e UCl₄ is the usual charge material used in the ion source (see reference 11f and reference 87d). Uranium ions are produced by passing a strong electric discharge through the UCl₄ vapour in a heated oven.

Obr. 50 Přibližné srovnání metod [18]

Velkou většinou metod zmíněných v Obr. 49 a Obr. 50 jsem se v této bakalářské práci zabýval. Rozebral jsem jejich princip, technologické i

ekonomické vlastnosti a v této kapitole se budu snažit provést jejich srovnání z ekonomického hlediska.

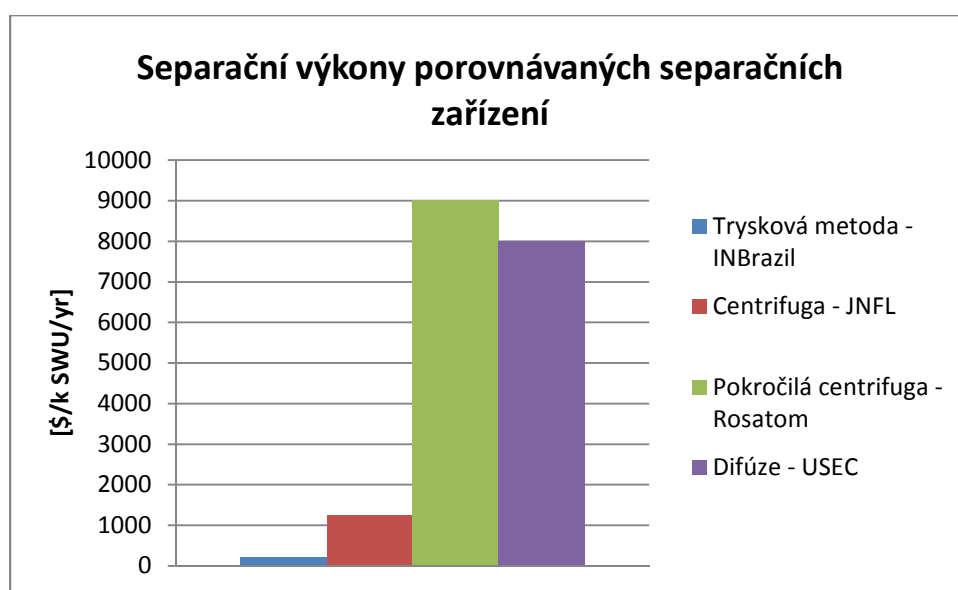
V poslední době si nejde nevšimnout nahrazování plynné difuze separací centrifugální (Tab. 9). Proces plynné difuze je jednoduchý, ale velmi energeticky náročný, zabírá velké území a potřebuje velké množství údržby a personálu. Centrifugální separace nabízí technologii se zařízením o stejném výkonu, ale v menších plošných rozměrech, menší údržbou a menší energetickou náročností. Tyto výhody jsou ale vykoupeny velkou pořizovací cenou vybavení a samotný výzkum a zdokonalování konstrukce stojí obrovský kapitál.

Ke srovnání použiji dostupné data z roku 2008 se započtenou inflací [20]. Z těchto dat jsem vybral čtyři obohacovací závody a tři obohacovací metody k porovnání:

Tab. 8 Data pro ekonomické srovnání [20]

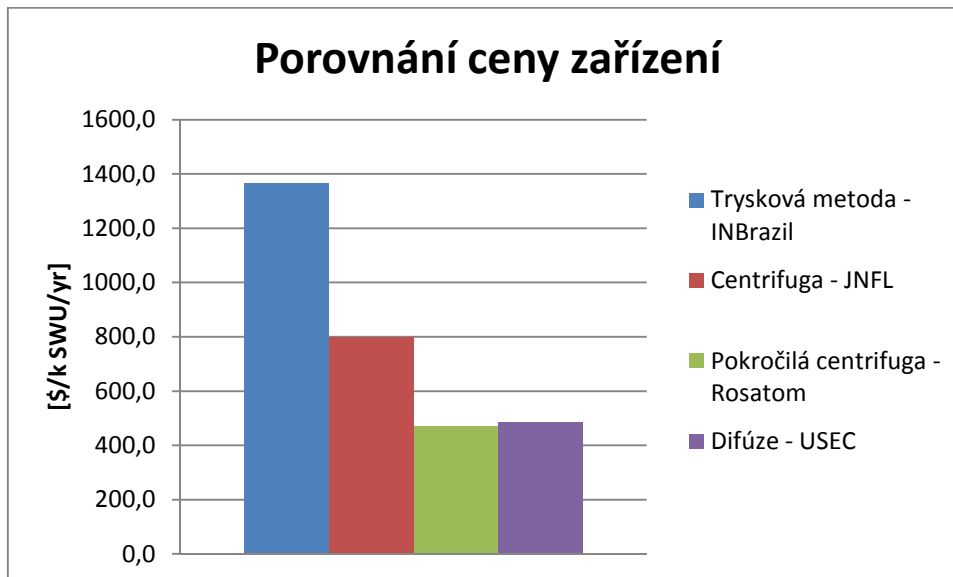
Obohacovací metoda	Tryska	Centrifuga	Pokročilá centrifuga	Difúze
Firma	INBrazil	JNFL	Rosatom	USEC
Závod	Resende	Rokkasho	Novauralsk	Padacah
Obohacovací kapacita [k SWU/yr]	203	1250	9000	8000
Celková cena [M\$]	277,7	998,7	4226,4	3878,5
Zaměstnanci [lidí]	100	230	571	541
Spotřeba elektrické energie [kWh/SWU]	100	50	50	2500
Cena materiálu na stavbu [M\$]	3,3	9,9	42,8	38,4
cena SWU [\$/SWU]	161,3	88,9	34,0	150,4

Porovnávané zařízení jsou velmi rozdílných celkových obohacovacích výkonů, ale tato skutečnost není tak významná, aby výrazně ovlivnila další porovnávané vlastnosti jednotlivých metod.



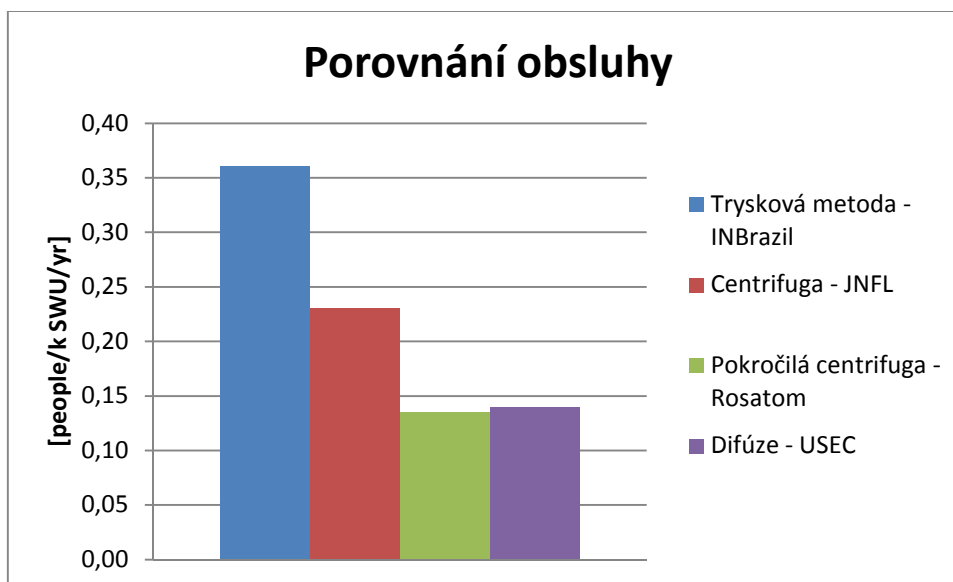
Obr. 51 Separační výkony porovnávaných separačních zařízení

Srovnání poměrné ceny výkonové jednotky ukazuje na výhodnost stavby velkých obohacovacích komplexů s velkým výkonem. Zařízení obohacující pomocí tryskové metody je díky nejmenší kapacitě finančně nejnáročnější. Zajímavé je poměrně stejná cena difúzní metody a obohacováním pomocí centrifug pokročilých konstrukcí.



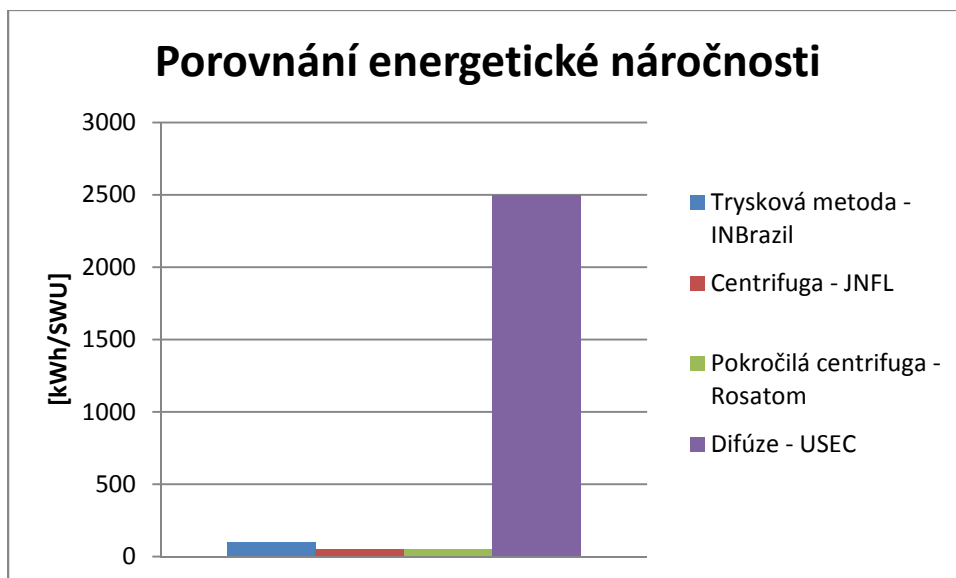
Obr. 52 Porovnání ceny zařízení

Nutnost obsluhy je u centrifugální a difúzní metody téměř srovnatelné, vyčnívá jen tryskové obohacování, díky velkým modulům obsahující obrovské množství trysek, které je v tomto ohledu náročnější.



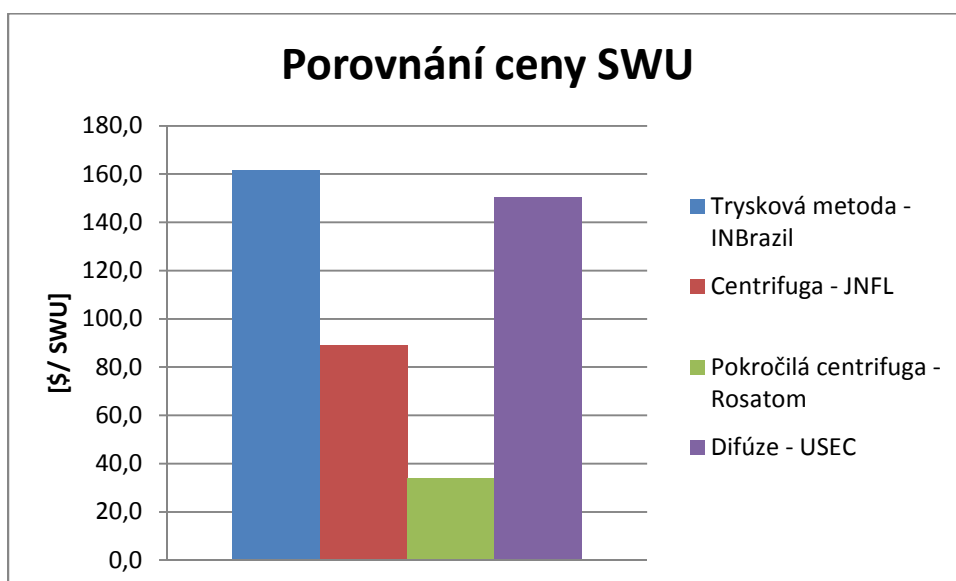
Obr. 53 Porovnání obsluhy

V následujícím porovnání jdou vidět obrovské energetické nároky plynné difuze, na které jsem v této práci již několikrát odkazoval.



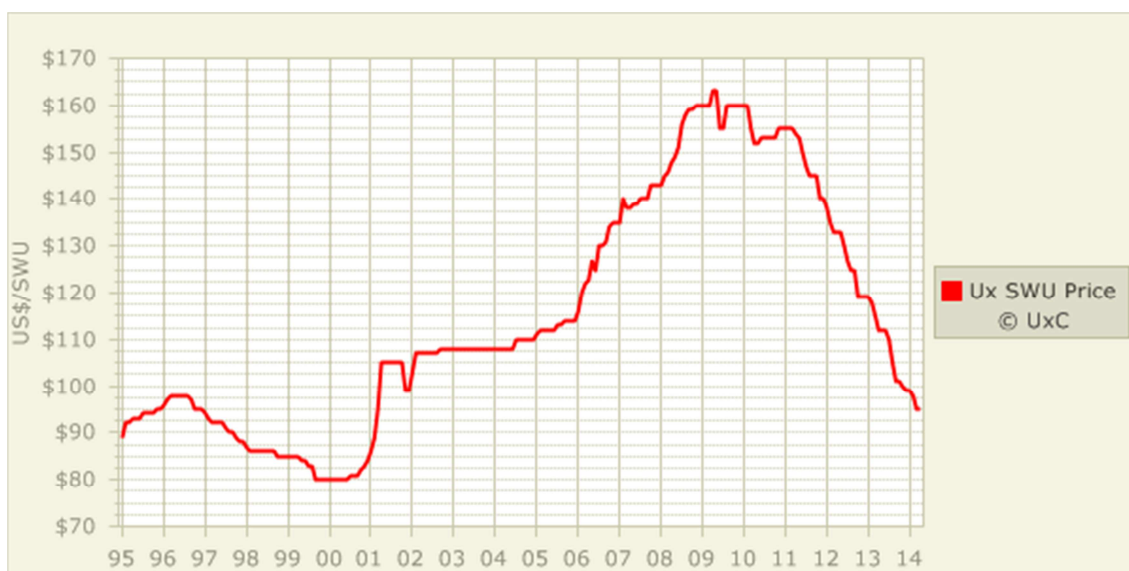
Obr. 54 Porovnání energetické náročnosti

Následné srovnání celkových nákladů na SWU vysvětluje minimální využití tryskové obohacovací metody a v dnešní době velmi významné nahrazování plyné difúze obohacovací metodou využívající centrifugální separaci. Hlavním důsledkem velké ceny SWU produkovaných plynou difúzí je obrovská energetická náročnost, cena SWU produkovaná tryskovou aerodynamickou metodou je zvýšena v důsledku velké pořizovací ceny a asi dvojnásobné energetické náročnosti v porovnání s centrifugálními metodami.



Obr. 55 Porovnání ceny SWU

Celková cena SWU nezávisí jen na obohacovacím procesu a metodě, případně energetických nárocích metody. Závisí také na ceně těžby uranu, transportu a výroby vstupního materiálu pro obohacovací proces (UF_6 , UCl_4 , ingoty U).



Obr. 56 Vývoj průměrné výkupní ceny SWU [31]

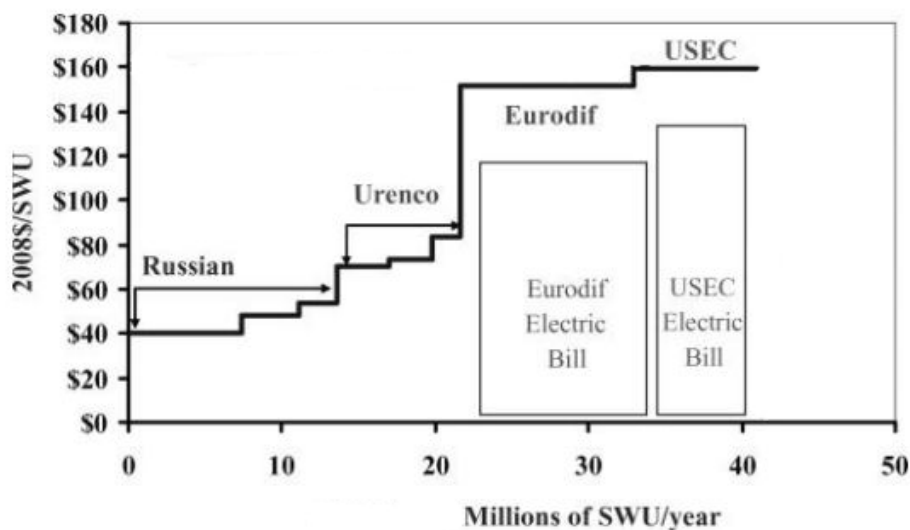
V posledních třech letech jde vidět pokles ceny SWU v důsledku nahrazování difúzní metody pro provoz levnější centrifugální metodou a poklesem ceny nyní primárně používaného UF₆.



Obr. 57 Vývoj ceny UF₆ [31]

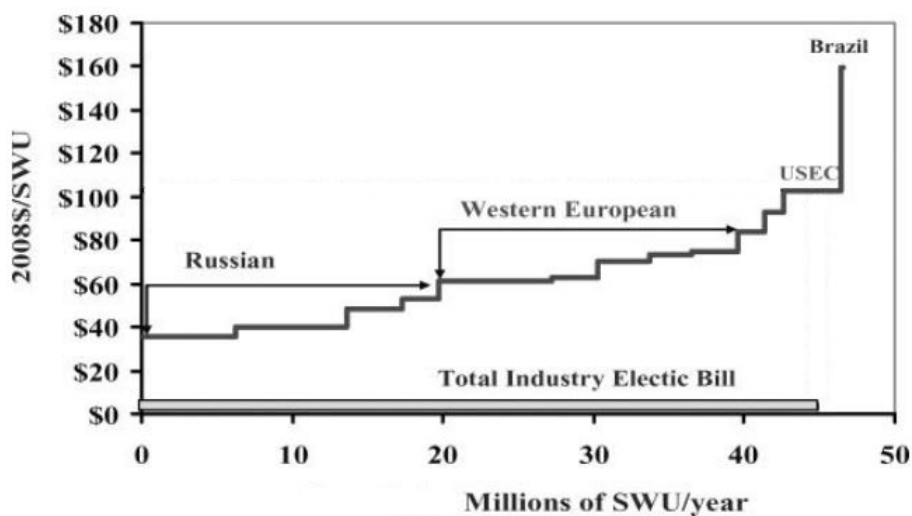
Statistiky v Obr. 58 jde vidět srovnání největších firem věnující se obohacování uranu na průmyslovém měřítku. Nejdražší SWU produkuje Eurodiff a USEC pomocí difúzních metod, nejlevnější SWU jsou produkovány v Rusku. Především státní firmou Rosatom, která nyní ve svých obohacovacích procesech používá zdokonalení centrifugální metody.

Následující dva grafy (Obr. 58, Obr. 59) zobrazují část světové produkce SWU. Délka vodorovné úsečky v grafu zobrazuje celkovou obohacovací kapacitu v milionech SWU/rok a poloha na ose y značí cenu produkovaného SWU. Z důvodu nedostatku zdrojů jsem musel použít starší statistiky pracující s cenami v dolarech s hodnotou z roku 2008 (2008\$).



Obr. 58 Statistika pro rok 2010 [20]

Statistiky pro rok 2020 znázorněné v Obr. 59 odhadují snížení ceny SWU asi o třetinu. Hlavním důsledkem je zvýšení Ruské obohacovací kapacity a vylepšení konstrukce centrifug dalších zemí. Dalším faktorem je odstavení drtivé většiny difúzních metod.



Obr. 59 Odhadované statistiky pro rok 2020 [20]

Následující tabulka popisuje zastoupení jednotlivých metod i s odhadem do budoucna, kdy se počítá s nasazením laseru využívajících metod (AVLIS, MLIS) na průmyslové úrovni. Tento odhad je vidět i v předešlém Obr. 59 při snížení ceny SWU v důsledku vyřazení plyné difúze.

Rádek tabulky ex jaderné zbraně je použití vysoce obohaceného uranu na hranici až 95% z vyražených atomových zbraní. Při smíchání tohoto vysoce obohaceného uranu s přírodním, ochuzeným, nebo mírně obohaceným uranem ve správném poměru jde vytvořit uran obohacený na úroveň použitelnou pro výrobu energie v jaderných reaktorech.

Tab. 9 Využití jednotlivých separačních metod a odhad do roku 2017 [8]

Rok	2000	2010	předpoklad 2017
Difúze	50%	25%	0
Centrifugy	40%	65%	93%
Laser	0	0	3%
Ex jaderné zbraně	10%	10%	4%

V roce 2000 je znatelné zastoupení starších obohacovacích závodů využívající obohacovací metodu plynné difúze.

V roce 2010 je už vidět velké nahrazování plynné difúze centrifugální separací.

V odhadech pro rok 2017 je plynná difúze zcela nahrazena centrifugální separací a odhaduje se částečné průmyslové nasazení pokročilých obohacovacích metod využívajících obohacovací proces využívající laserů (AVLIS, MLIS).

10 Závěr

V této práci jsem se věnoval obohacování uranu od úplných začátků, kdy za druhé světové války, v letech 1942-1945, USA poprvé obohatili uran za účelem vyvinutí první atomové zbraně. Použili přitom energeticky nedokonalou elektromagnetickou separaci, velmi pomalou tepelnou difúzi a energeticky náročnou plynnou difúzi. Po druhé světové válce se stala celosvětově nejpoužívanější metodou obohacování uranu právě plynná difúze. Ta je v dnešní době ve velké míře nahrazována separací pomocí centrifug. I když jsou technologicky a konstrukčně velmi náročné, umožňují obohacovat uran za velmi malých energetických nároků. Jejich údržba je nenáročná a dokáží být ve velké míře ovládány elektronicky.

Dnešní pokročilé centrifugy dokáží obohacovat uran asi za čtvrtinovou cenu a spotřebují jen 2 % energie, kterou by potřebovala plynná difúze. Ruský Rosatom provozuje asi nejpokročilejší centrifugy dneška. Na svých stránkách uvádí, že vlastní 40% světové kapacity na obohacování uranu a provozuje nejefektivnější centrifugy [26].

Možná ještě v tomto století uvidíme vyzkoušení průmyslového nasazení pokročilých obohacovacích metod, které jsou nyní ve vývoji. Nejvíce se nyní experimentuje s metodami používající excitaci atomů (AVLIS), excitaci molekul UF_6 (MLIS) a separaci pomocí rezonance plazmy. Tyto pokročilé metody už v experimentálních testech překonaly dnešní nejlepší centrifugy. Mají až pětikrát menší energetické nároky, ale jejich technologická náročnost v dnešní době neumožňuje využití na průmyslové úrovni.

Tak jako kdysi centrifugy předčily plynnou difúzi, je možné že se jedna z dnes vyvíjených technologií zdokonalí na dostatečnou úroveň a nabídne ještě levnější obohacený uran na výrobu paliva do energetických jaderných reaktorů využívající uran.

Při vypracování této práce jsem se setkal s velkým problémem při vyhledávání informací. Přesné statistiky a metod jsou i v dnešní době utajované a většina pokročilých obohacovacích metod je vyvíjena v polovojenských programech a je velmi těžké najít relevantní informace ke srovnání.

1 1 Použitá literatura

- [1] ŠTAMBERG, K. *Technologie jaderných paliv I.* 1. vyd. Praha: ČVUT, 1996.
- [2] FRY, C., M. THOENNESSEN, Frederick D ROSSINI a Donald D WAGMAN. Discovery of actinium, thorium, protactinium, and uranium isotopes. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. 2013, vol. 99, issue 3, s. 345-364. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.adt.2012.03.002>.
- [3] BRENNECKA, Gregory A., Lars E. BORG, Ian D. HUTCHEON, Michael A. SHARP a Ariel D. ANBAR. Natural variations in uranium isotope ratios of uranium ore concentrates: Understanding the ²³⁸U/²³⁵U fractionation mechanism. *Earth and Planetary Science Letters*. 2010, vol. 291, 1-4, s. 228-233. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2010.01.023>.
- [4] LENFLE, Sylvain. The strategy of parallel approaches in projects with unforeseeable uncertainty: The Manhattan case in retrospect. *International Journal of Project Management*. 2011, vol. 29, issue 4, s. 359-373. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijproman.2011.02.001>.
- [5] MAIER-KOMOR, Petr. Uranium isotope separation from 1941 to the present *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, vol 613, issue 3, s 465-472, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2009.10.005>.
- [6] YERGEY, Alfred L. a A. Karl YERGEY. Preparative scale mass spectrometry: A brief history of the calutron. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*. 1997, vol. 8, issue 9, s. 943-953. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1044-0305\(97\)00123-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1044-0305(97)00123-2).
- [7] REED, B. Cameron. Liquid Thermal Diffusion during the Manhattan Project. *Physics in Perspective*. 2011, vol. 13, issue 2, s. 161-188. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00016-010-0039-0>.
- [8] *Uranium Enrichment* [online]. 2013, October 2013 [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Conversion-Enrichment-and-Fabrication/Uranium-Enrichment/>
- [9] *Physics of Uranium and Nuclear Energy*. [online]. 2012, May 2012 [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Introduction/Physics-of-Nuclear-Energy/>
- [10] EZOUBTCHENKO, A.N., H. AKATSUKA a M. SUZUKI. Isotope separation methods for self-consistent nuclear energy system. *Progress in Nuclear Energy*. 1998, vol. 32, 3-4, s. 729-735. DOI: 10.1016/S0149-1970(97)00086-3. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0149197097000863>
- [11] SCHWAB, C., A.J. DAMIÃO, C.A.B. SILVEIRA, J.W. NERI, M.G. DESTRO, N.A.S. RODRIGUES, R. RIVA a A. MIRAGE. Laser techniques applied to isotope separation of uranium. *Progress in Nuclear Energy*. 1998, vol. 33, 1-2, s. 217-264. DOI: 10.1016/S0149-1970(97)00100-5.

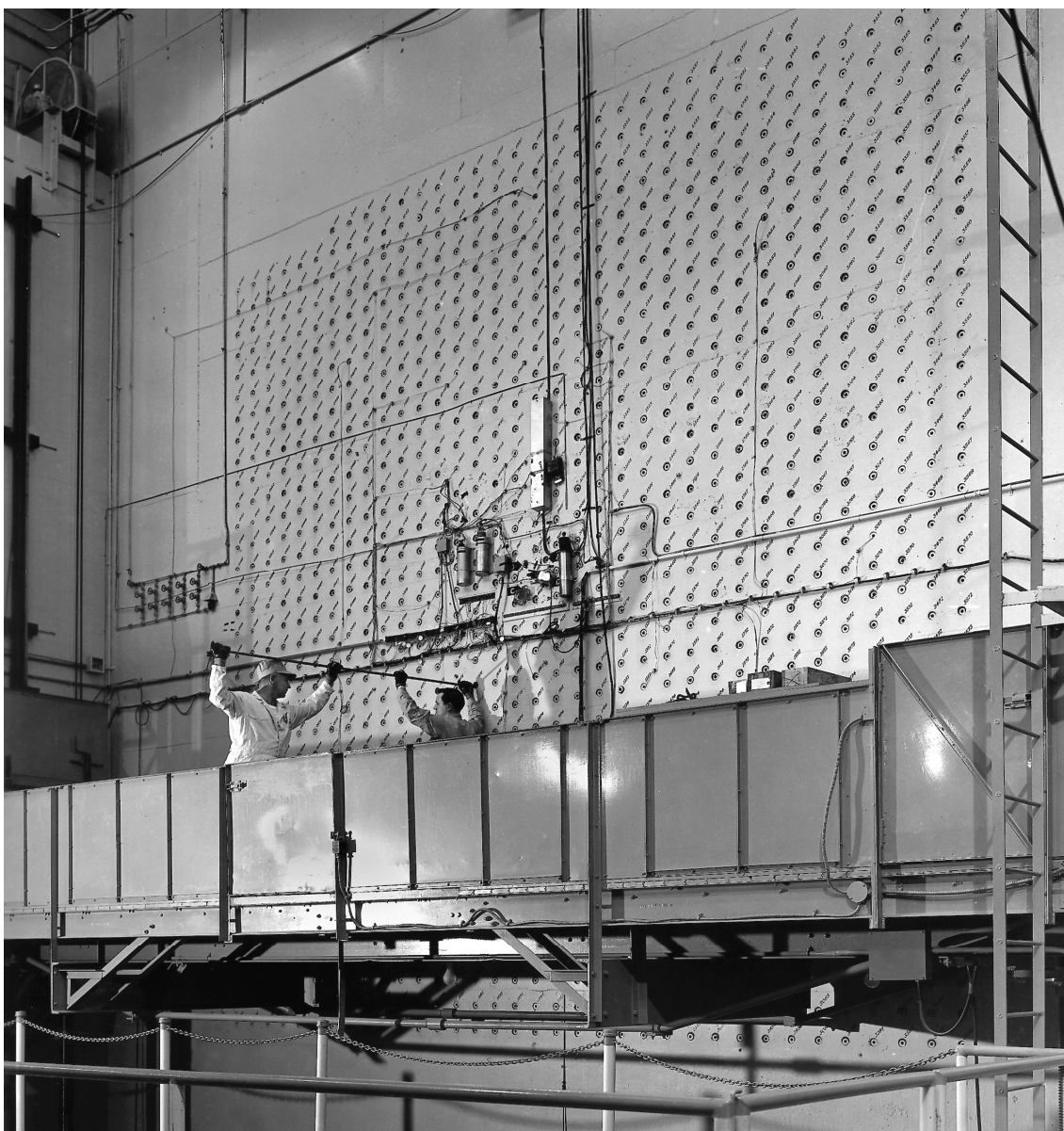
- Dostupné
z:<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0149197097001005>
- [12] KEMP, R. SCOTT. Gas Centrifuge Theory and Development: A Review of U.S. Programs. *Science*. 2009-06-26, vol. 17, issue 1, s. 1-19. DOI: 10.1080/08929880802335816. Dostupné
z:<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08929880802335816>
- [13] SERRANO, Daniel A. a Horacio S. WIO. Effect of the pore size distribution on the separation factor of membranes used as barriers for isotopic separation by gaseous diffusion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1997, vol. 40, issue 18, s. 4289-4294. DOI: 10.1016/S0017-9310(97)00086-0. Dostupné
z:<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931097000860>
- [14] GLASER, ALEXANDER. Characteristics of the Gas Centrifuge for Uranium Enrichment and Their Relevance for Nuclear Weapon Proliferation. *Science*. 2008-10-15, vol. 16, 1-2, s. 1-25. DOI: 10.1080/08929880802335998. Dostupné
z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08929880802335998>
- [15] BENEDICT, Manson, Thomas H PIGFORD a Hans Wolfgang LEVI. *Nuclear chemical engineering: Second Edition*. 2d ed. New York: McGraw-Hill, c1981, xv, 1008 p. ISBN 00-700-4531-3.
- [16] HWANG, Sun-Tak a Karl KAMMERMEYER. *Membranes in separations*. New York: Wiley, 1975, xxii, 559 p. ISBN 04-719-3268-X.
- [17] WHITAKER, J. M., *Uranium Enrichment Plant Characteristics – a Training Manual for the IAEA*, Oak Ridge National Laboratory, Report No. ORNL/TM-2005/43, May 2005.
- [18] KRASS, Allan S. *Uranium enrichment and nuclear weapon proliferation*. New York: International Publications Service, Taylor, 1983, xviii, 296 p. ISBN 0-85066-219-2.
- [19] SMITH, L. Eric, Emily K. MACE, Alex C. MISNER a Mark W. SHAVER. Signatures and Methods for the Automated Nondestructive Assay of UF₆ Cylinders at Uranium Enrichment Plants. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. vol. 57, issue 4, s. 2247-2253. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/tns.2010.2052287>
- [20] ROTHWELL, GEOFFREY. Market Power in Uranium Enrichment. *Science*. 2009-10-30, vol. 17, 2-3, s. 132-154. DOI: 10.1080/08929880903423586. Dostupné
z:<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08929880903423586>
- [21] KAHOUli, Sondès. Effects of technological learning and uranium price on nuclear cost: Preliminary insights from a multiple factors learning curve and uranium market modeling. *Energy Economics*. 2011, vol. 33, issue 5, s. 840-852. DOI: 10.1016/j.eneco.2011.02.016. Dostupné
z:<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140988311000685>

- [22] KAWAKAMI, Fumiaki, Moriyasu TOKIWAJ a Yasuhiko FUJII. Plant designing of ion exchange chemical uranium enrichment and its non-proliferation aspects. *Progress in Nuclear Energy*. 2011, vol. 53, issue 7, s. 974-979. DOI: 10.1016/j.pnucene.2011.04.019. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0149197011000771>
- [23] ABED, Abdulkader M. a Rushdi M. SADAQAH. Enrichment of uranium in the uppermost Al-Hisa Phosphorite Formation, Eshidiyya basin, southern Jordan. *Journal of African Earth Sciences*. 2013, vol. 77, s. 31-40. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2012.09.009. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1464343X12001720>
- [24] HERIOT, I.D. *Uranium enrichment by gas centrifuge*. Luxembourg: Commission of the European Communities, 1988. ISBN 92-825-8960-9.
- [25] NELSON, James A., Ernest F. JOHNSON, R. MERRIMAN, IAEA, OECD a OECD. Power Supply to Gas Centrifuge Uranium Enrichment Plant. *IEEE Power Engineering Review*. 1983, PER-2, issue 7, s. 15-58. DOI: <http://dx.doi.org/10.1787/uranium-2009-3-en>.
- [26] Rosatom: Uranium enrichment services. *Rosatom.ru* [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: http://www.rosatom.ru/en/areas_of_activity/nuclear_fuel_cycle/uranium_enrichment_services/
- [27] *Atomicarchive* [online]. 2013 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.atomicarchive.com/>
- [28] *FAS: Federation of American Scientists* [online]. 2013 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.fas.org/programs/ssp/nukes/fuelcycle/centrifuges/cascales.html>
- [29] *Energy from thorium* [online]. 2010 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://energyfromthorium.com/>
- [30] MAKHIJANI, Arjun, Lois CHALMERS a Brice SMITH. URANIUM ENRICHMENT: Just Plain Facts to Fuel an Informed Debate on Nuclear Proliferation and Nuclear Power. *URANIUM ENRICHMENT*. 2004.
- [31] *The UX consulting company* [online]. 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.uxc.com/>
- [32] *Urenco: SWU* [online]. 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.urengo.com/page/24/SWU.aspx>

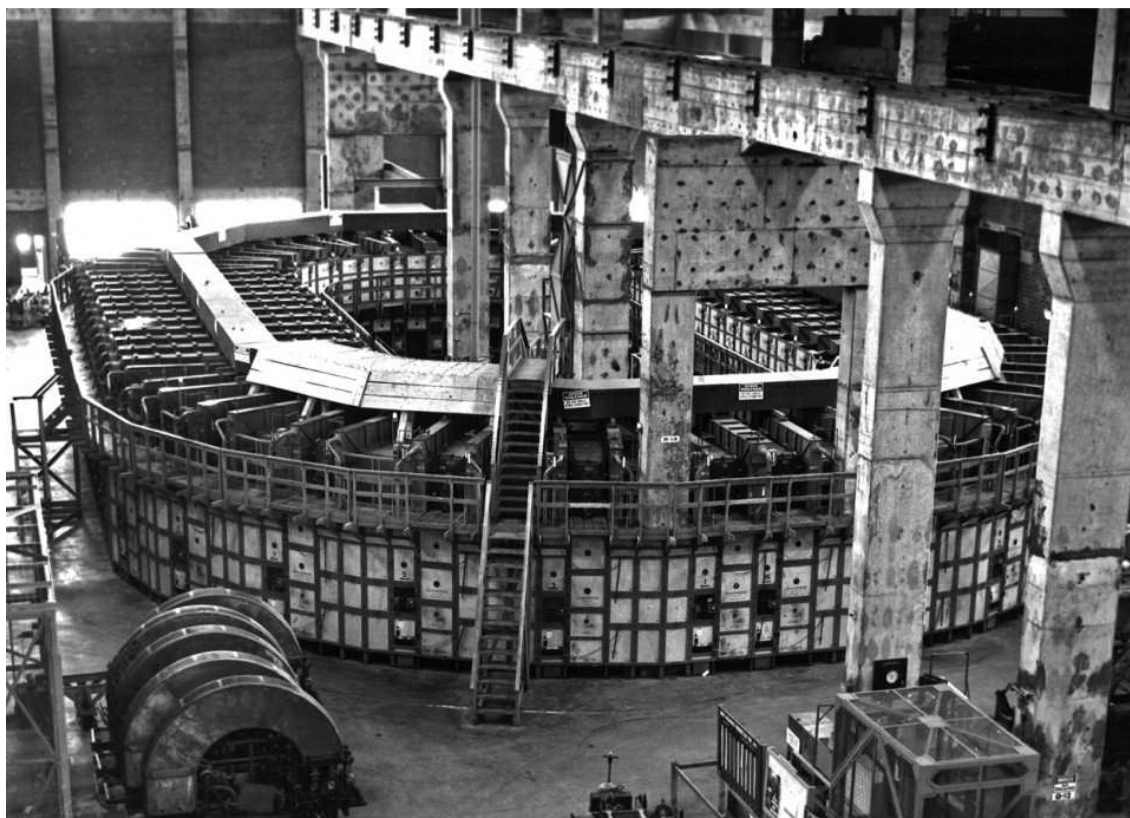
12 Seznam použitých symbolů

B	intenzita magnetického pole [T]
c	molární hustota [mol m^{-3}]
D_{AB}	Koeficient difuze [-]
E	Modul pružnosti [GPa]
f	Otáčky rotoru [Hz]
I	Proud procházející elektromagnetem [A]
l	Výška rotoru [m]
m	hmotnost iontu [kg]
M_A	molární hmotnost $^{235}\text{UF}_6$ [g/mol]
M_B	molární hmotnost $^{238}\text{UF}_6$ [g/mol]
m_f	Hmotnost vstupního materiálu [kg]
m_p	Hmotnost obohaceného výstupu [kg]
m_t	Hmotnost ochuzeného výstupu [kg]
N	molární zlomek $^{235}\text{UF}_6$ ve směsi $^{235}\text{UF}_6$ a $^{238}\text{UF}_6$ [-]
N_a	molární zlomek $^{235}\text{UF}_6$ ve směsi $^{235}\text{UF}_6$ a $^{238}\text{UF}_6$ po separaci [-]
N_b	molární zlomek $^{235}\text{UF}_6$ ve směsi $^{235}\text{UF}_6$ a $^{238}\text{UF}_6$ před separací [-]
P	Separační výkon [SWU/rok]
P	Výkon elektromagnetu [kW]
q	náboj iontu [C]
r_c	poloměr kruhové trajektorie [m]
r	poloměr rotoru [m]
R	univerzální plynová konstanta [$\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}$]
r, z, θ	válcové (cylindrické) souřadnice s počátkem v ose rotace na dně rotoru [m, m, rad]
R_m	Meze pevnosti v tahu [MPa]
T	teplota plynu [K]
U	Napětí elektromagnetu [V]
U_u	urychlovací napětí [kV]
v_i	rychlost iontu [ms^{-1}]
v	Obvodová rychlost [ms^{-1}]
$v_{\max}$	Maximální obvodová rychlost rotoru [m s^{-1}]
x_f	Obohacení vstupního materiálu [-]
x_p	Obohacení výchozího uranu [-]
x_t	Obohacení ochuzeného výstupu [-]
α	separační poměr [-]
ϱ	Hustota [kg/m^3]
Ω	uhlová rychlost rotoru [rad s^{-1}]
p_o/p_s	Poměr tlaku na obvodu centrifugy a v ose rotace [-]

13 Přílohy



Příloha obr. 1 Vkládání paliva do reaktoru X-10 [27]



Příloha obr. 2 Umístění calutronů v budově [7]



Příloha obr. 3 Zdroj soli, urychlovací a ionizační zařízení calutronu [7]



Příloha obr. 4 Záchytné komory calutronu [7]



Příloha obr. 5 Cívky elektromagnetů calutronu [7]



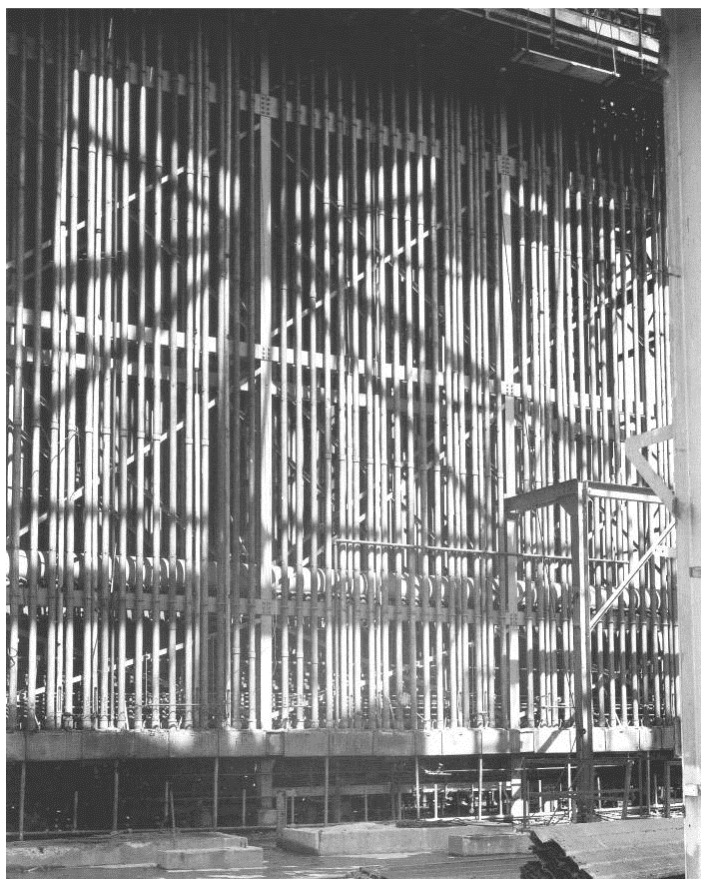
Příloha obr. 6 Řídící místnost calutronů v Y-12 [7]



Příloha obr. 7 Calutrony dnes [27]



Příloha obr. 8 Budova S-50 [8]



Příloha obr. 9 Kolony S-50[8]



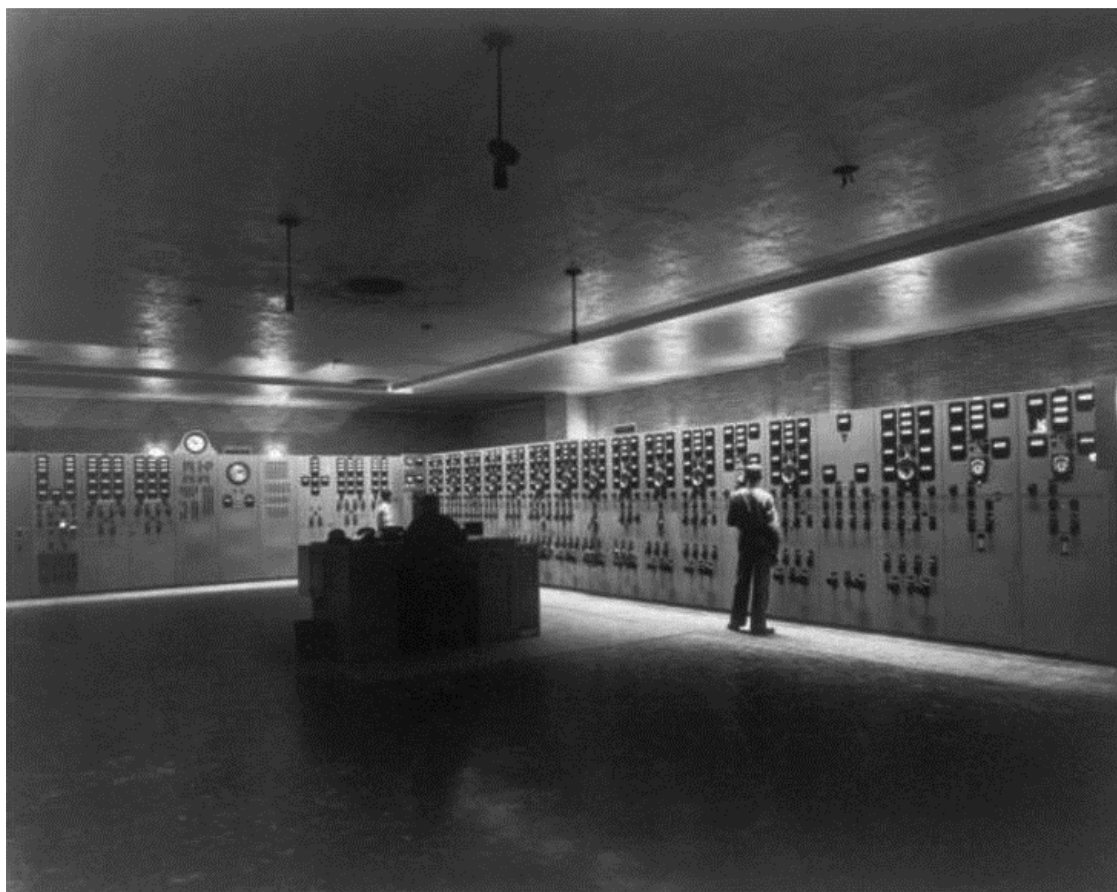
Příloha obr. 10 Budova projektu K-25 [27]



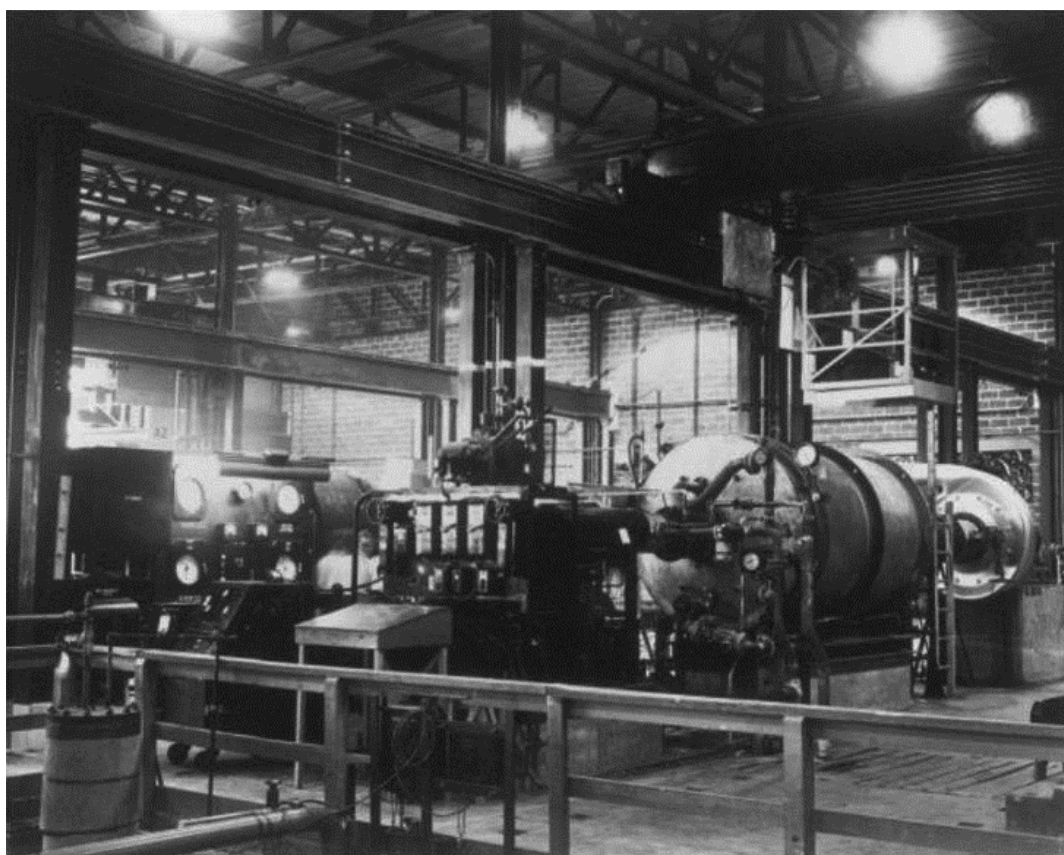
Příloha obr. 11 K-25 v demolici [27]



Příloha obr. 12 Demolice K-25 [27]



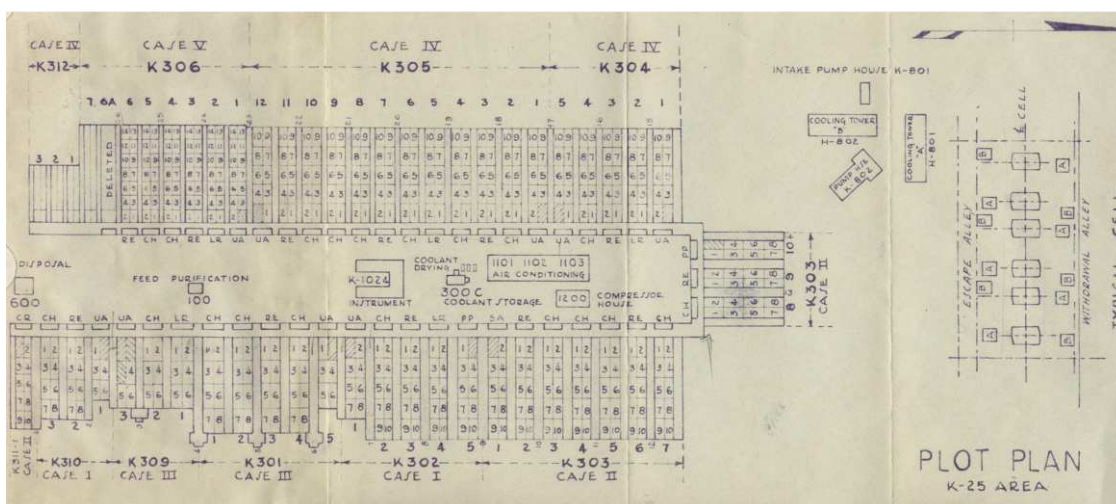
Příloha obr. 13 Řídicí místnost K-25 [10]



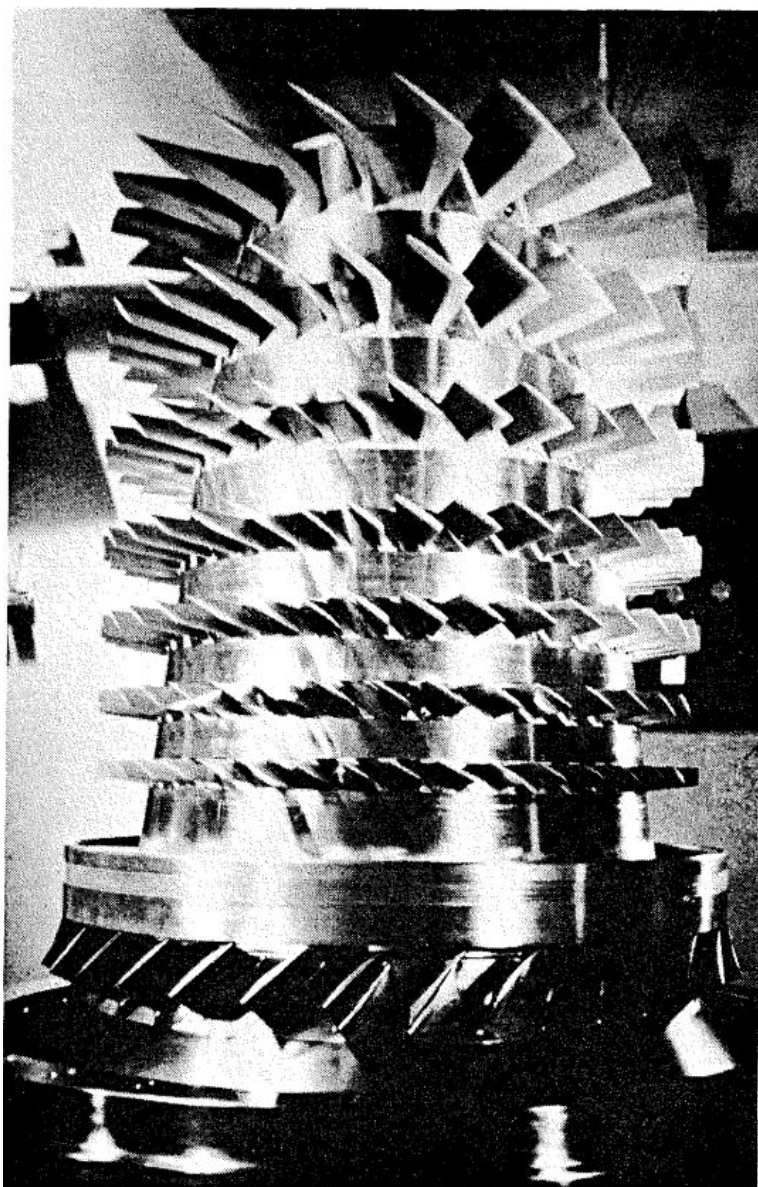
Příloha obr. 14 Separátory v K-25 [17]



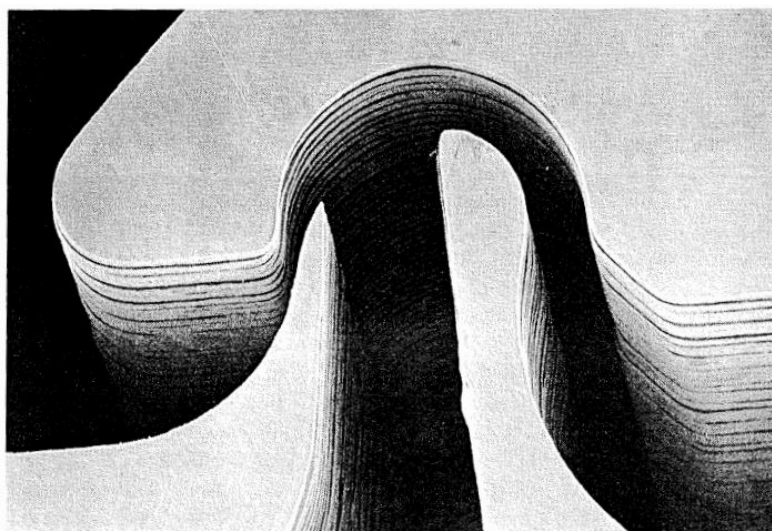
Příloha obr. 15 Pumpy v K-25 [17]



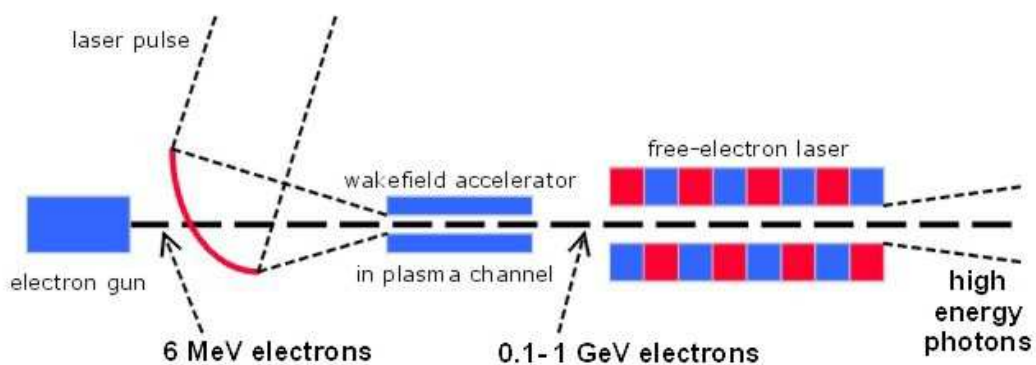
Příloha obr. 16 Plán budovy K-25 [27]



Příloha obr. 18 Rotor axiálního kompresoru aerodynamické separace [17]

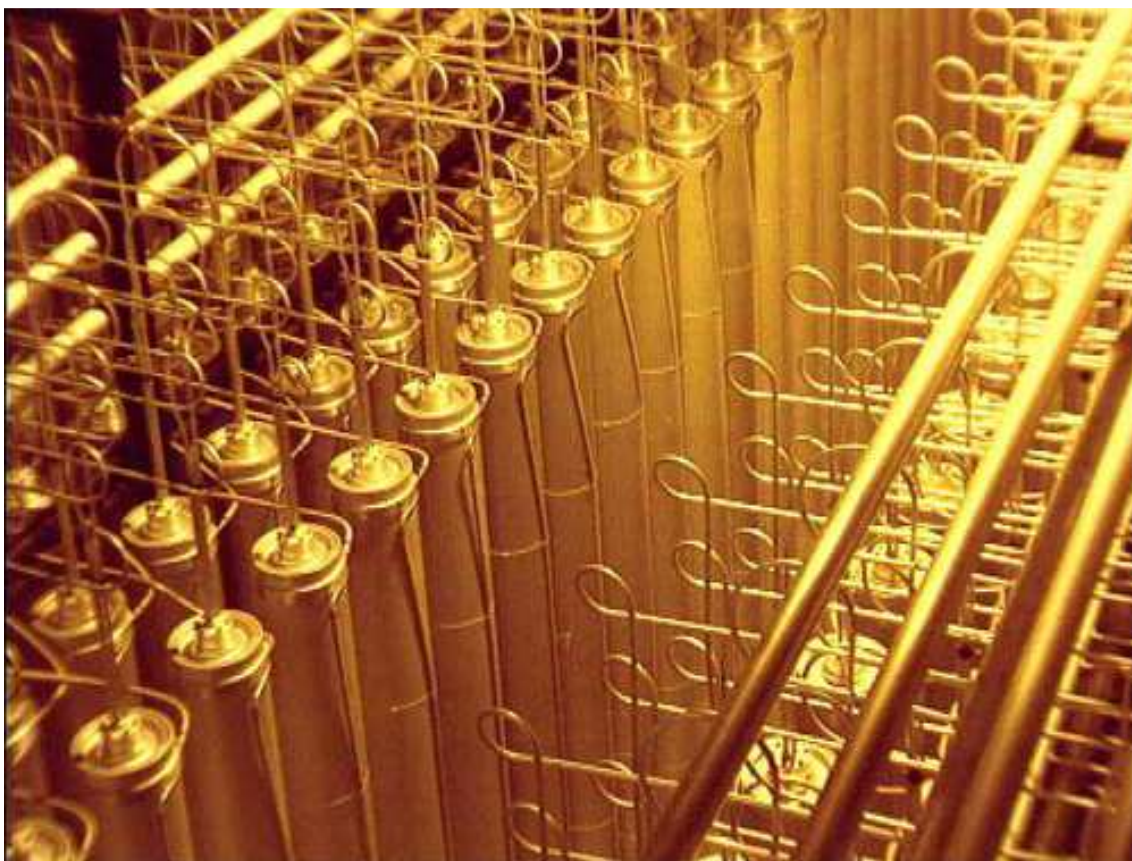


Příloha obr. 19 Reálný pohled na trysku aerodynamického procesu z fólií [17]



Schematic overview of the ALPHA-X set-up

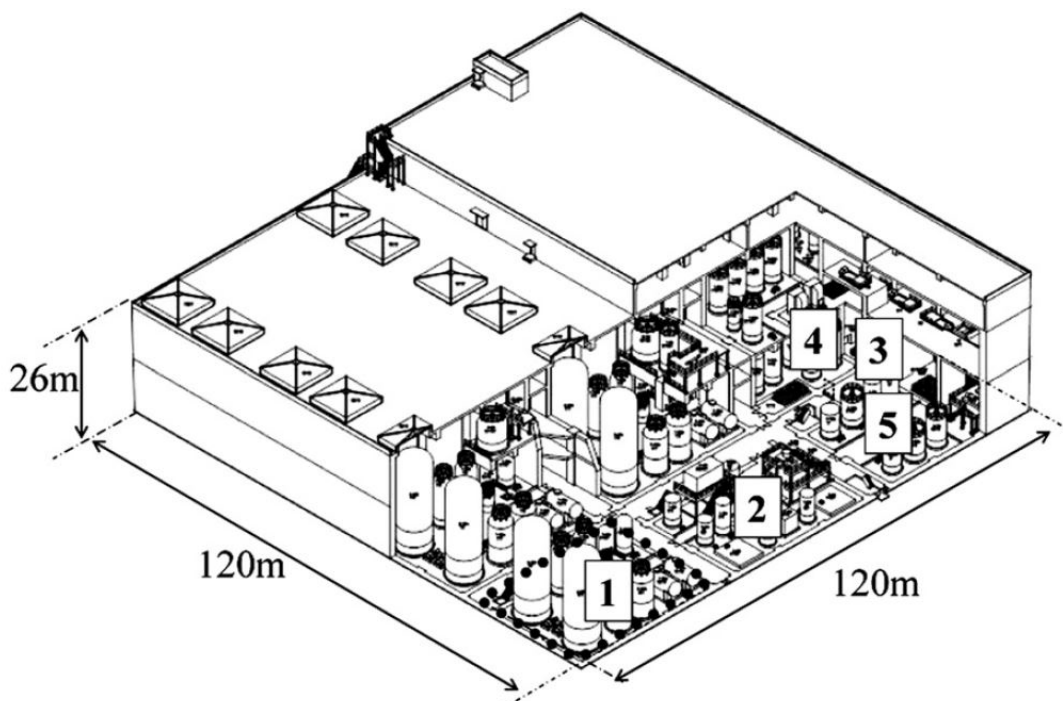
Příloha obr. 20 Princip laseru na bázi volných elektronů [11]



Příloha obr. 21 Kaskáda centrifug [20]



Příloha obr. 22 Kaskáda centrifug



Příloha obr. 23 Schéma obohacovacího komplexu ASAHI – 1400tSWU/rok
1 – obohacovací kolony, celkem 7; 2 – zařízení na zpracování odpadních produktů reakce; 3 – zařízení na zpracování vstupního uranu; 4 – zařízení na zpracování obohaceného uranu; 5 – zařízení na zpracování ochuzeného uranu [17]