VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

TERMOJADERNÁ FÚZE A JEJÍ ENERGETICKÉ VYUŽITÍ

THERMONUCLEAR FUSION FOR POWER PRODUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Jakub Hladík

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. Ladislav Šnajdárek

SUPERVISOR

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	**Jakub Hladík**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Ladislav Šnajdárek**
Akademický rok:	2017/18

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:

Termojaderná fúze a její energetické využití

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hlavní náplní práce je provedení rešerše v oblasti výzkumu termojaderné fúze, popis jednotlivých výzkumných zařízení a koncepce využití termojaderné fúze pro výrobu elektrické energie.

Cíle bakalářské práce:

- Popis principu termojaderné fúze
- Popis výzkumných zařízení termojaderné fúze
- Popis koncepce využití termojaderné fúze pro produkci elektrické energie

Seznam doporučené literatury:

USHAKOV, V. Y. Electrical power engineering. 1. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-62300-9.

SONG, Y., et al. Tokamak engineering mechanics. 1. New York: Springer, 2013. ISBN 978-3-642-39574-1.

CHANDRASEKHAR, S. An introduction to the study of stellar structure. [Republication]. New York: Dover, 1958. ISBN 978-048-6604-138.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 5. 11. 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
DĚKANÁT
L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Účelem této bakalářské práce je formou rešerše čtenáři přiblížit princip termojaderné fúze, její objev a výzkum, dále princip udržení fúze, druhy reaktorů využívajících termojadernou fúzi a následné jejich využití v energetice.

Klíčová slova

Fúze, plasma, tokamak, stelarátor, energetika, jádro

ABSTRACT

The aim of this barchelor thesis is to acquaint the reader by the means of research with the principles of thermonuclear fusion and its discovery. It also contains the principles of mantaining the fusion, and the types of nuclear reactors using the thermonuclear fusion and their utilisation in power engineering.

Key words

Fusion, plasma, tokamak, stellarator, power engineering, nucleus

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HLADÍK, J. *Termojaderná fúze a její energetické využití.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Šnajdárek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Termojaderná fúze a její energetické využití** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

--- ---

Datum Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Ladislav Šnajdárek za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD 11
1 Termojaderná fúze všeobecně 12
1.1 Princip termojaderné fúze 12
1.2 Termojaderná fúze v přírodě 13
2 Objev a výzkum termojaderné fúze 16
3 Využití termojaderné fúze v energetice 18
3.1 Motivace k využití termojaderné fúze 18
3.2 Získávání energie z termojaderné fúze 20
3.2.1 Magnetické udržení 23
3.2.2 Inerciální udržení 24
3.2.3 Další způsoby získávání energie z termojaderné fúze 24
3.2.4 Termojaderná elektrárna 25
4 Tokamaky 31
4.1 Princip tokamaku 31
4.2 Tokamak COMPASS 33
4.3 Tokamak JET 34
4.4 Projekt ITER 36
5 Stelarátory 38
5.1 Princip stelarátoru 38
5.2 Wendelstein 7-X 39
ZÁVĚR 41
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 42
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 44
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK 45

podpis

ÚVOD

Současná energetická situace vytváří otázku, jak budeme v budoucnu získávat energii. Momentální závislost na fosilních palivech je neudržitelná a získávání energie z obnovitelných zdrojů je neúčinné a nedostatečné. Odpověď na tuto otázku můžeme hledat v přírodě. A to energií, kterou nejen lidstvo využívá už od počátku naší planety. Tou je energie hvězd – jaderná fúze.

Tato bakalářská práce se zabývá právě inspirací k termojaderné fúzi (podkapitola 1.2), jejím objevem a výzkumem (kapitola 2) a dále pak jejím energetickým využitím (kapitola 3). Jsou zde popsány principy termojaderné fúze (podkapitola 1.1), současné postavení lidstva v jejím výzkumu a její budoucnost k získávání elektrické energie.

V kapitole 4 je popsán princip v současnosti nejzvažovanějšího zdroje termojaderné fúze na zemi, tokamaku. Dále pak informace o tokamaku JET, současném největším tokamaku na světě, tokamaku ITER, nejdůležitějším projektu současnosti na poli fúzní energie, a tokamaku COMPASS, který jsem zařadil, neboť se jedná o největší tokamak na území České republiky.

V kapitole 5 je znázorněn alternativní přístup k fúznímu reaktoru, a to stelarátory. Je zde popsán princip stelarátoru a velmi nadějný největší současný stelarátor na světě Wendelstein 7-X.

Budoucností energetiky a cílem této bakalářské práce by tak mohla být termojaderná fúzní elektrárna, která je znázorněna a popsána v podkapitole 3.2.4.

1 Termojaderná fúze všeobecně

1.1 Princip termojaderné fúze

Termojaderná fúze funguje na principu sloučení dvou lehčích jader do jednoho těžšího jádra, jehož pokojová hmotnost je menší než součet hmotností sloučených lehčích jader. Tento rozdíl hmotností m se promění v energii dle Einsteinova vzorce:

$$E = m \cdot c^2 \qquad 1.1$$

Tato energie se následně uvolní buď ve formě kinetické energie, nebo ve formě záření.

Nejjednodušší formou termojaderné fúze je slučování dvou jader vodíku na jádro deuteria. Při sloučení se jeden z protonů změní na neutron za vzniku pozitronu a vyzáření energie ve formě gama záření.

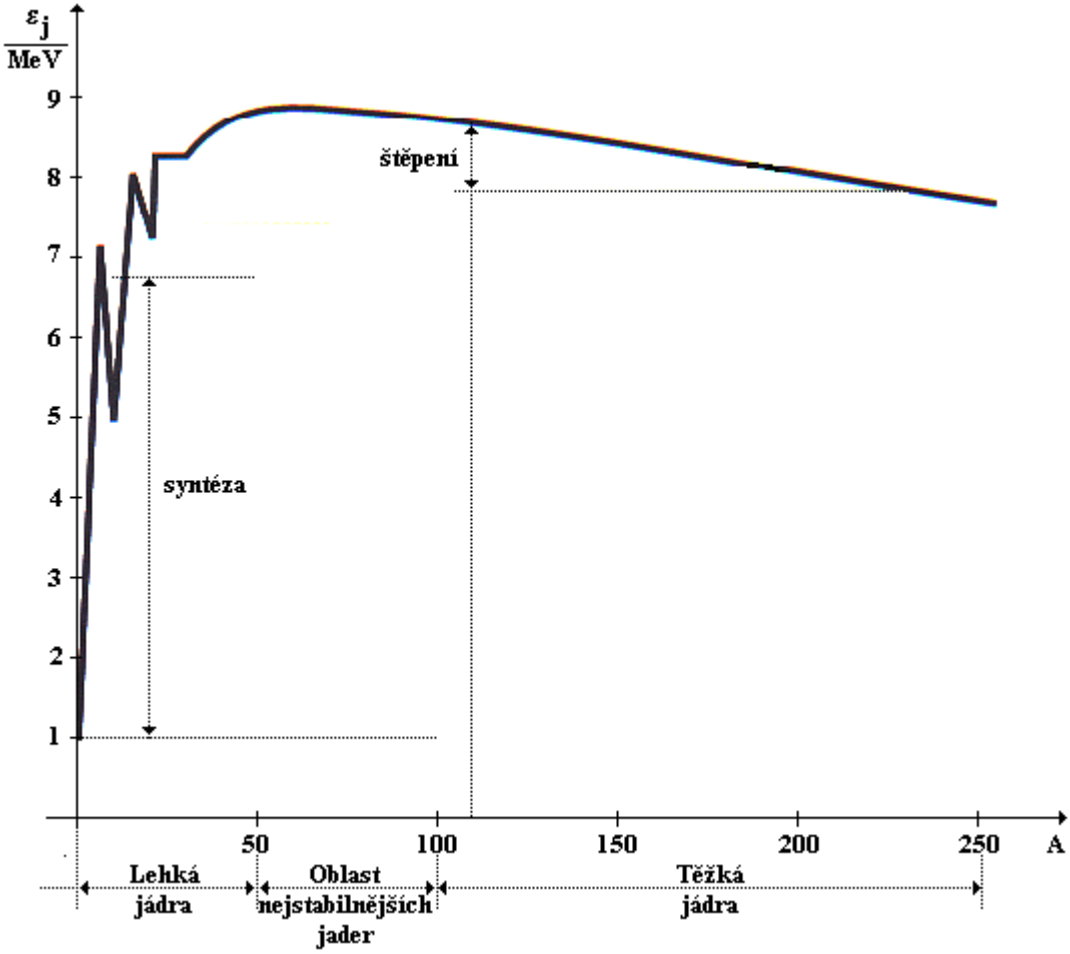
$$^{1}_{1}\mathrm{H} + ^{1}_{1}\mathrm{H} = ^{2}_{1}\mathrm{H} + \mathrm{e}^{+} + \gamma \qquad 1.2$$

Proti sloučení dvou jader avšak působí odpudivé síly (Coulombova interakce), neboť náboj obou jader je kladný. Jádra se musí dostat na vzdálenost 10^{-14}m, aby jaderné síly malého dosahu překonaly odpudivé síly a došlo ke sloučení jader. Toho lze docílit dvěma způsoby. První spočívá v urychlení jádra v urychlovači na dostatečnou rychlost, aby kinetická energie jádra překonala odpudivé síly. Druhý způsob je ohřátí jádra (v řádech milionů stupňů K). Z tohoto důvodu je také jednodušší sloučit jádra s nižším protonovým číslem, neboť mají menší elektrický náboj. [4]

Slučovat lze prvky s nižší separační energií (vazebná energie připadající na jeden nukleon), než má jádro železa ^{56}Fe. U prvků těžších než ^{56}Fe probíhá místo jaderné syntézy jaderné štěpení za vzniku lehčích a stabilnějších jader. Což je zobrazeno na Obr. 1.1. Separační energii získáváme ze vztahu:

$$\varepsilon_j = \frac{E_j}{A}, \qquad 1.3$$

kde E_j je vazebná energie a A nukleonové číslo. [5]



Obr. 1.1 Závislost separačních energií na nukleonovém čísle [5]

1.2 Termojaderná fúze v přírodě

V přírodě se termojaderná fúze objevuje především ve hvězdách, kde je zdrojem jejich energie. Naší nejbližší hvězdou s probíhající termojadernou fúzí je Slunce, díky které je možný život na zemi.

Na Slunci probíhá fúze při teplotě jádra $1{,}5.10^{15}$ K tzv. proton-protonovým cyklem. Tento cyklus probíhá ve třech krocích. V první části cyklu se zprvu slučují dvě jádra vodíku ^{1}H za vzniku deuteria. Uvolňuje se pozitron a neutrino. Pozitron vzápětí anihiluje s elektronem v jádru Slunce za vzniku gama záření (rov. 1.2). Při tomto kroku vzniká 1,44 MeV energie. Při druhém kroku se deuterium, vzniklé v prvním kroku, spojí s dalším atomem vodíku ^{1}H za vzniku izotopu helia ^{3}He a uvolnění 5,494 MeV energie (rov. 1.4). V posledním, třetím kroku, se spojí dva izotopy helia ^{3}He za vzniku izotopu ^{4}He a dvou jader vodíku ^{1}H (Rov. 1.5). V tomto kroku se uvolní 12,859 MeV energie. [6]

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} = {}^{3}_{2}\mathrm{He} + \gamma \qquad 1.4 $$

$$ {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{3}_{2}\mathrm{He} = {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \qquad 1.5 $$

Na Slunci ale stále není tak vysoká teplota, aby částice protonu dosáhly dostatečné kinetické energie k překonání odpudivých elektrických sil. Avšak dle kvantové mechaniky existuje pravděpodobnost, že se dvě částice protonu dostanou tak blízko sebe, že se začne projevovat silná jaderná síla a dojde k fúzi. Tato pravděpodobnost je sice velmi malá, ale díky obrovskému množství částic, nacházejících se ve Slunci, dochází k těmto reakcím prakticky neustále.

Za přibližně pět miliard let Slunce vyčerpá zásoby vodíku v jádře a to se začne smršťovat. Dojde ke zvýšení teploty jádra, které zahřeje okolní vrstvy a tím v nich dojde k zažehnutí proton-protonového cyklu. Díky vyšším teplotám bude cyklus probíhat mnohem rychleji, dojde k většímu zářivému výkonu hvězdy a vnější vrstvy Slunce expandují. Slunce postupně pohltí tři své nejbližší planety: Merkur, Venuši a nejspíš i vysušenou Zemi. Promění se v rudého obra. V případě větších hvězd (kdy při smrštění jádra dosáhne teplota 100 milionů Kelvinů) dojde k zahájení termojaderné fúze hélia za vzniku uhlíku (3-alfa proces):

$$ {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} = {}^{8}_{4}\mathrm{Be} + \gamma \qquad 1.6 $$

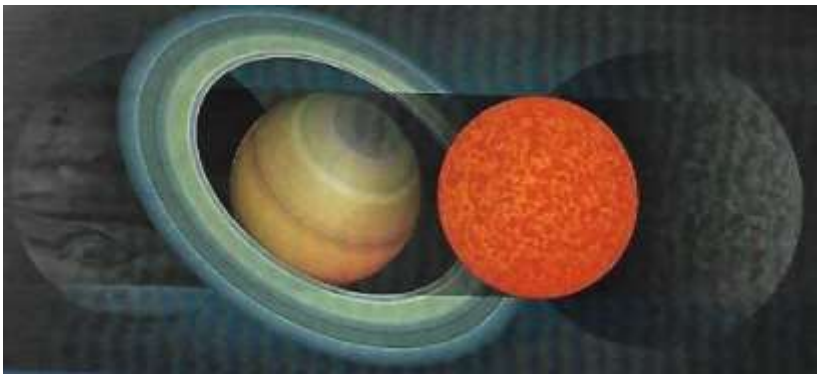
$$ {}^{8}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} = {}^{12}_{6}C + \gamma \qquad 1.7 $$

Pokud začne na hvězdě zároveň probíhat proton-protonový cyklus a 3-alfa proces, nepovažuje se dále tato hvězda za rudého obra. [7] [8]

Slunce však není dostatečně hmotné k zažehnutí 3-alfa procesu, a tak za přibližně dvanáct miliard let dojde k odhození vnějších vrstev, které vytvoří planetární mlhovinu. Ze slunce zbyde pouze neaktivní jádro a stane se tak bílým trpaslíkem, na kterém již neprobíhá jaderná fúze.

Mezi další tělesa ve vesmíru, která využívají jadernou fúzi, patří veleobři. Po jednom až dvou milionech let dojde k vyčerpání helia v jádru hvězdy a tím začne spalování uhlíku. Proces následně pokračuje fúzí těžších prvků až po železo. Život veleobrů končí za vzniku supernovy.

Na druhé straně velikostního spektra bylo v roce 2018 objeveno vědci z univerzity v Cambridgi těleso, které má nejmenší možné rozměry k zahájení termojaderné fúze. Její název je EBLM JO555-57ab. Vzdálenost této hvězdy od země činí 600 milionů světelných let. Je součástí binárního systému. Její velikost je jen o málo větší než velikost Saturnu. Fúzi umožňuje především velká hmotnost hvězdy, přibližně třistakrát větší než Země. [9]



Obr. 1.2 Porovnání velikosti EBLM JO555-57ab s planetou Saturn [9]

Přestože má Jupiter větší velikost než EBLM JO555-57ab a vyzáří do vesmíru více energie, než přijme od Slunce, neprobíhá v jeho jádře jaderná fúze kvůli nízkým teplotám. Výdej energie je pravděpodobně zapříčiněn pohybem tekutých vrstev uvnitř planety.

2 Objev a výzkum termojaderné fúze

První zmínka o uvolňování energie při sloučení atomů pochází z období okolo roku 1920. V této době vydává Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944) svou knihu „The Internal Constitution of the Stars“. V ní se zaobírá rozdílem hmotností samostatných atomů vodíku s hmotností atomů helia. V této knize napsal:

„Zformování helia z vodíku tak zahrnovala ztrátu 0,8% hmotnosti; odpovídající energie se tak musí uvolnit při sloučení.“

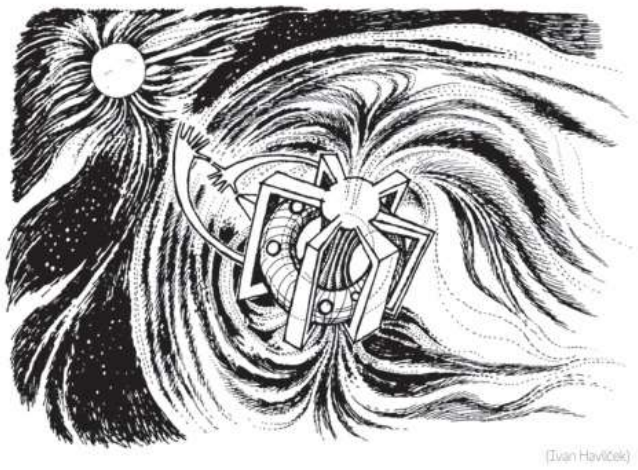
Tím, za pomocí Rov 1.1, předložil správnou myšlenku zdroje energie hvězd. Do té doby byl tento zdroj energie naprostou záhadou. [10]

První zmínku přímo o fúzi musíme však hledat až v roce 1926. V tomto roce duo vědců Friedrich Paneth a Kurt Peters publikovali své výsledky o sloučení jader vodíku za vzniku fúze. Tuto reakci nazvali studenou fúzí. Avšak později své výsledky zpochybnili a oznámili, že výsledné helium naměřili z okolního vzduchu.

V roce 1934 dochází k první jaderné fúzi na zemi, kdy dvě jádra deuteria v urychlovači získávají dostatečnou kinetickou energii ke vzniku jádra helia a neutronů. Za touto reakcí stálo trio vědců: Ernest Rutherford, M. L. E. Oliphan a P. Harteck. Právě Oliphan později prohlásil:

„…neměli jsme jakoukoliv představu o tom, že by to mohlo být použito k vytvoření vodíkové bomby. Naše zvědavost byla pouze zvědavostí ohledně struktury jádra atomu a objev těchto reakcí byl, jak by řekli Američané, čistě náhodný.“ [4] [12]

Další krok k dosažení termojaderné fúze se uskutečnil v letech 1936-1938 ve Spojených státech amerických. Arthur Kantrowitz a Eastman Jacobs, zaměstnanci NACA (National Advisory Committee for Aeronautics, předchůdce NASA), navrhli zahřát plazmu mikrovlnami ve vakuové nádobě ve tvaru toroidu, oddělené od stěn magnetickým polem. Původně se mělo jednat o reakci dvou atomů deuteria, ale kvůli neschopnosti sehnání deuteria bylo nahrazeno vodíkem. V roce 1938 byl ale projekt zrušen pro neuspokojivé výsledky. [11]



Obr. 2.1 Umělecká představa Kantrowitcova toroidu [11]

Následující období bylo pro výzkum jaderné fúze přívětivé především kvůli závodům zbrojení mezi USA a SSSR a s ním spojený výzkum vodíkové bomby. V roce 1950 prohlásil tehdejší americký prezident Harry S. Truman: „Urychlete vývoj vodíkové bomby!“

K zásadnímu vývoji nicméně dochází v Sovětském svazu. V témže roce dostává Ústřední výbor KSSS dopis od Olega Alexandroviče Lavrenťjeva, ve kterém popisuje výrobu vodíkové bomby založené na deuteriu lithia, a návod k sestrojení termojaderného reaktoru, který by využíval k udržení plazmy elektrostatické pole. K posouzení dostal dopis Andrej Dmitrijevič Sacharov, pozdější nositel Nobelovy ceny míru. Ten byl dopisem uchvácen, nahradil elektrostatické pole magnetickým, a v roce 1958 představili, spolu s Igorem Jevgeněvičem Tammem, první tokamak. [4]

Souběžně však probíhal výzkum vodíkové bomby, na které se významně podílel právě Sacharov. Ten se připojil k projektu běžícímu od roku 1948 pod krycím názvem Truba. Sacharov kompletně přepracoval plán bomby a ta se pod názvem Slojka stala 12. 8. 1953 první úspěšně otestovanou vodíkovou bombou. Dále se pak Sacharov podílel na první dvoufázové vodíkové bombě s názvem RDS-37 a největší odpálené bombě v historii s názvem Car-bomba o energii 50 megatun TNT. [13]

Paralelně s výzkumem tokamaku probíhal na Princetonské univerzitě v USA výzkum stelarátoru. V roce 1951 představil americký teoretický fyzik Lyman Spitzer první návrh stelarátoru na světě. Ten na rozdíl od tokamaku nepoužívá k udržení magnetického pole elektrický proud protékající plazmatem.

V následujících letech 20. století převládal názor, že budoucností termojaderné fúze jsou tokamaky. To dosvědčuje projekt JET (Joint European Torus), jehož projektové práce byly zahájeny v roce 1973. Dostavěn byl o deset let později. Mezi další nejvýznamnější projekty tokamaků bezesporu patří projekt ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Plánování tohoto projektu bylo oznámeno v roce 1987 v Ženevě. [4]

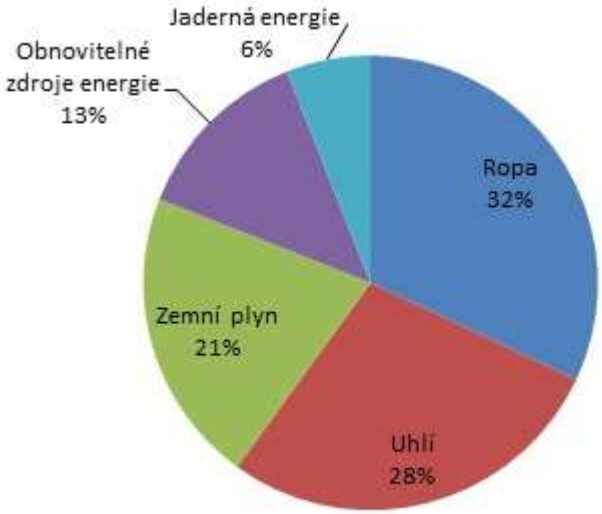
Stelarátory se vrátily do hry až v 80. letech, kdy dvojice německých vědců Jürgen Nührenberg a Allen Boozer představila návrh Weldensteinu 7-X. K tomu jim výrazně pomohla modernější výpočetní technika, která dokázala navrhnout mnohem přesnější tvar komory stelarátoru než v 50. letech. Weldenstein 7-X byl dostavěn v říjnu roku 2015.

3 Využití termojaderné fúze v energetice

3.1 Motivace k využití termojaderné fúze

V současné době existují dva důvody pro výzkum termojaderné fúze. První je současná energetická situace a druhý ekologická stránka věci.

Dnešní energetický průmysl je z velké části závislý na fosilních palivech. Součet procentuálního zastoupení výroby energie ropy, uhlí a zemního plynu dosahuje až 81%. Největší podíl na této skutečnosti má ropa, a to až z 32%. Přitom právě ropa má z uvedených paliv nejkratší odhadovanou dobu k vypotřebování zásob. Jedná se o přibližně 40 let. U zemního plynu přibližně 65 let a u uhlí cca 200 let. Současné technologie výroby energie z obnovitelných zdrojů nemohou pokrýt rostoucí spotřebu energie (pokud se nejedná o specifické případy států s unikátními přírodními podmínkami, např. Norsko produkuje drtivou většinu své energie z vodních elektráren), a tak budoucností výroby energie je jaderná energetika. Ať už v krátkodobém horizontu jaderným štěpením, či v dlouhodobém právě jadernou fúzí. [1]



Obr. 3.1 Současná energetická situace [1]

Dalším důvodem k využití termojaderné fúze je účinnost získávání energie. Výhřevnost černého uhlí se pohybuje okolo 21,3 $MJ.kg^{-1}$ (dle ČEZ v roce 1994), benzinu 42,7 $MJ.kg^{-1}$. U jaderného paliva je situace trochu složitější. Nemluvíme zde o výhřevnosti, nýbrž o vyhoření, které se udává v megawattdnech 1 MWd = $8{,}64.10^4$ MJ. Jaderné palivo, které se používá v JE Temelín, dosahuje hodnot cca 45 $MWd.kg^{-1}$= $3{,}9.10^6$ $MJ.kg^{-1}$. U termojaderné fúze by se ovšem jednalo o téměř čistou přeměnu hmoty na tepelnou energii, takže by dosahovala mnohonásobně vyšší výhřevnosti. [14]

Zdroje energie	Množství ve standardnách jednotkách paliva	
	Teoretické	Praktické
Uhlí	17900	637
Ropa	1290	179
Zemní plyn	398	89,6
Palivo využívané v JE	67200	1340

Tab. 3.1 Světové energetické zdroje ve standardních jednotkách paliva[1]

Zdroje energie	Množství v MJ	
	Teoretické	Praktické
Uhlí	524470	18664
Ropa	37797	5245
Zemní plyn	11661	2625
Palivo využívané v JE	1968960	39262

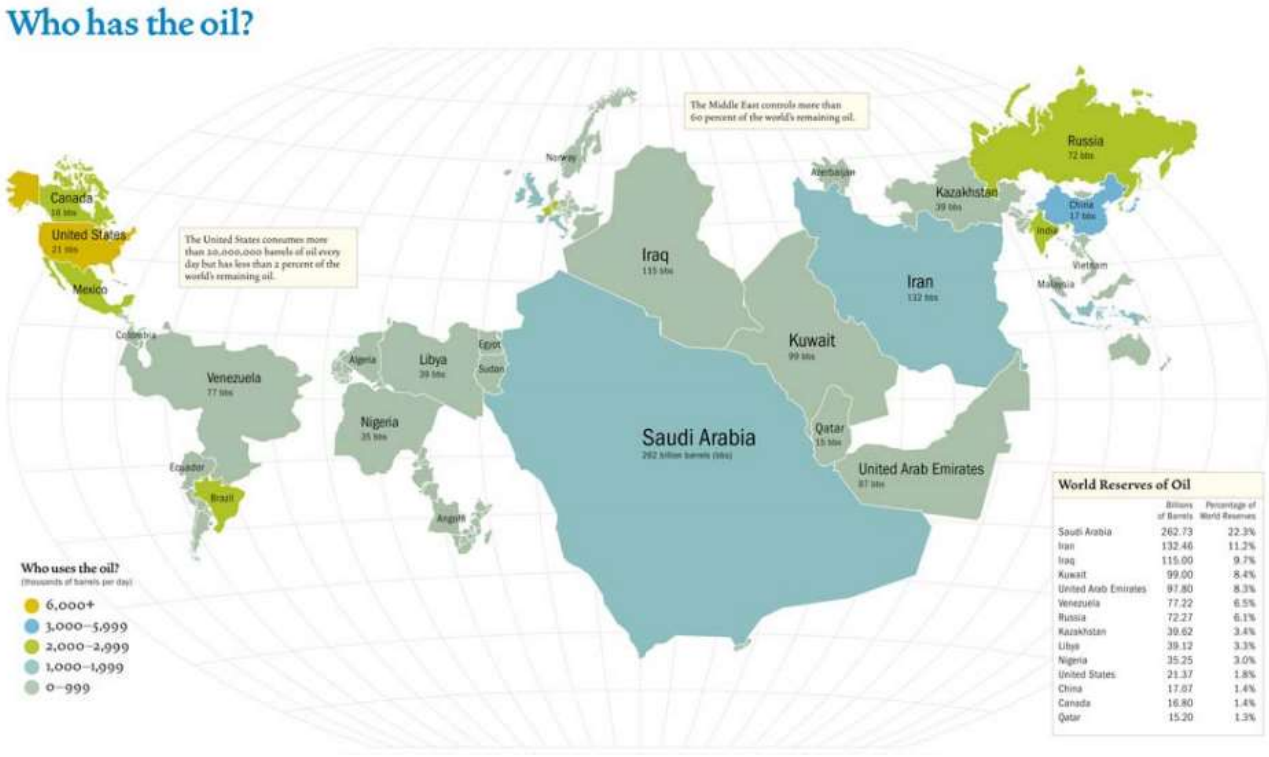
Tab. 3.2 Světové energetické zdroje v MJ[1]

Pokud spojíme výše uvedené informace dohromady, dostaneme se k hodnotě nazvané „standardní jednotka paliva“. Tato hodnota odpovídá množství paliva, jehož spálení vydá 29,3 MJ tepla. V Tab. 3.1 jsou uvedeny hodnoty standardních jednotek paliva v miliardách tun pro jednotlivé druhy paliv. Sloupec praktických zásob znázorňuje množství standardních jednotek paliva, které je možné získat a využít za současných technologií. Sloupec teoretických zásob znázorňuje množství paliva na planetě. Naproti tomu se paliva využívaného v jaderné fúzi nachází na zemi dostatek. V oceánech se nachází přibližně $4{,}76.10^{16}$ kg deuteria a $2{,}44.10^{14}$ kg lithia[15]. Při momentální spotřebě energie by nám toto množství mělo vystačit na téměř osm miliard let. A jak již bylo zmíněno v podkapitole *1.2 Termojaderná fúze v přírodě*, Slunce se začne měnit na rudého obra za cca šest miliard let. Tudíž by nám palivo využívané pro termojadernou fúzi mělo vydržet po celou existenci planety Země.

Z ekologického hlediska by byla termojaderná fúze nejčistším možným zdrojem energie na světě. Samotná fúze totiž probíhá zcela bez emisí, tudíž by veškeré nežádané plyny pocházely pouze z obvyklých komponent elektrárny. Termojaderná fúze navíc neprodukuje žádné vyhořelé palivo. Odpadem fúze je helium, které se využívá v řadě odvětví a na Zemi je ho nedostatek. Prodej helia je tak další motivací k výzkumu i po ekonomické stránce.

Oproti současným jaderným elektrárnám využívající jaderné štěpení nemůže při použití jaderné fúze dojít k neřízené reakci. Jaderná fúze je tak v pozemních podmínkách zcela bezpečná (u vodíkové bomby se k zahájení výbuchu využívá neřízená štěpná reakce).

Dalším důvodem k využití termojaderné fúze je rozložení zdrojů paliv na Zemi. Nacházíme se v situaci, kde 30 % populace spotřebuje až 90 % vyrobené elektrické energie[1]. Jak je vidět na Obr. 3.2, nachází se největší zásoby ropy v Perském zálivu, zatímco největší spotřebitelé jsou státy Severní Ameriky a Evropské unie. Oproti tomu zdrojem termojaderné fúze je mořská voda. Díky rozložení moří a oceánů bude tento zdroj energie dostupný na celé planetě.



Obr. 3.2 Rozložení zdrojů ropy a její spotřebitelé [16]

3.2 Získávání energie z termojaderné fúze

Hledání správného zdroje energie pomocí termojaderné fúze začíná při hledání vhodné reakce na zemi. Již dříve uvedený proton-protonový cyklus (rov. 1.4 a rov. 1.5) probíhající na Slunci není vhodný z hlediska malé pravděpodobnosti uskutečnění. Dalším kritériem je počet slučujících prvků. Tato reakce musí obsahovat pouze dva reaktanty, neboť pravděpodobnost reakce tří reaktantů je výrazně menší. Navíc hledáme reakci, která uvolňuje co nejvíce energie. Dle Obr. 1.1 se proto musíme zaměřit na prvky s nízkým atomovým číslem. Pro vhodnou variantu termojaderné fúze vyplývají tyto tři reakce (dále budeme označovat deuterium ^{2}H jako D a tritium ^{3}H jako T):

$$\mathrm{D} + \mathrm{T} = {}^{4}_{2}\mathrm{He} + \mathrm{n} \qquad 3.1$$

$${}^{3}_{2}\mathrm{He} + \mathrm{D} = {}^{4}_{2}\mathrm{He} + \mathrm{p} \qquad 3.2$$

$$\mathrm{D} + \mathrm{D} = {}^{3}_{2}\mathrm{He} + \mathrm{n} \qquad 3.3.a$$

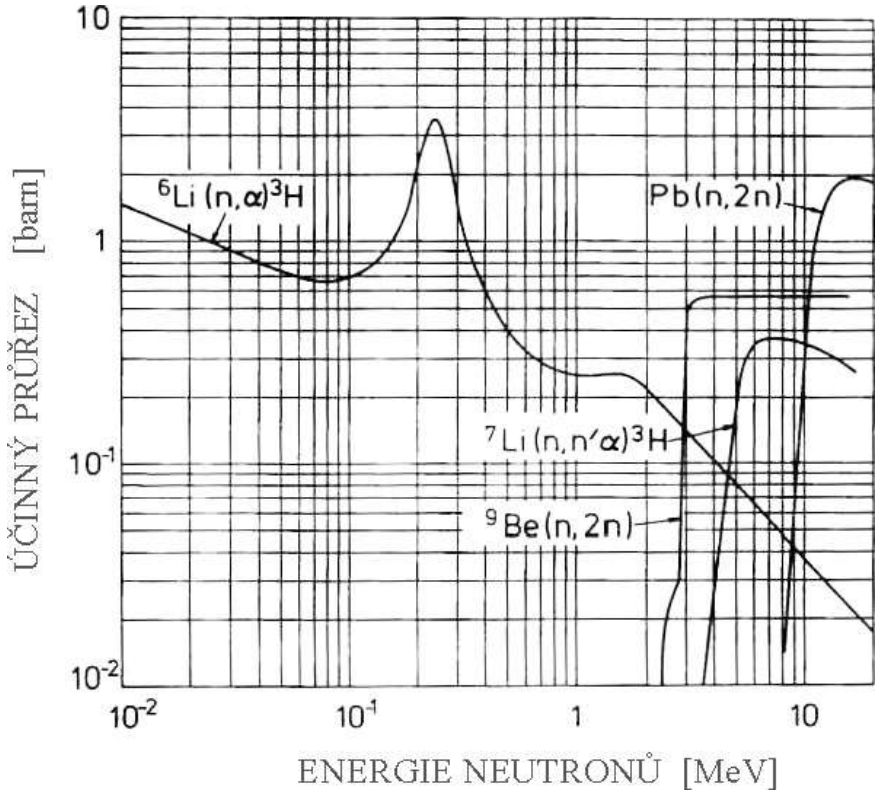
$$\mathrm{D} + D = \mathrm{T} + \mathrm{p} \qquad 3.3.b$$

Nejčastěji zmiňovanou variantou je reakce z rov. 3.1. Především díky největšímu množství uvolněné energie oproti ostatním variantám. Deuterium je izotop vodíku běžně se vyskytující ve vodě. Přibližně odpovídá jeden atom deuteria na 6700 atomů vodíku ^{1}H[1]. Tritium se avšak nevyskytuje volně ve vodě. Jedná se o radioaktivní izotop vodíku s poločasem rozpadu 12,3 roku. K jeho vytváření se počítá s reakcí lithia a neutronu pocházejícího z rov. 3.1 přímo ve fúzních reaktorech. Tato reakce je popsána v rov. 3.4.a a rov. 3.4.b.

$$^{6}_{3}\mathrm{Li} + \mathrm{n} = ^{4}_{2}\mathrm{He} + \mathrm{T} \qquad 3.4.a$$

$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + \mathrm{n} = ^{4}_{2}\mathrm{He} + \mathrm{T} + \mathrm{n} \qquad 3.4.b$$

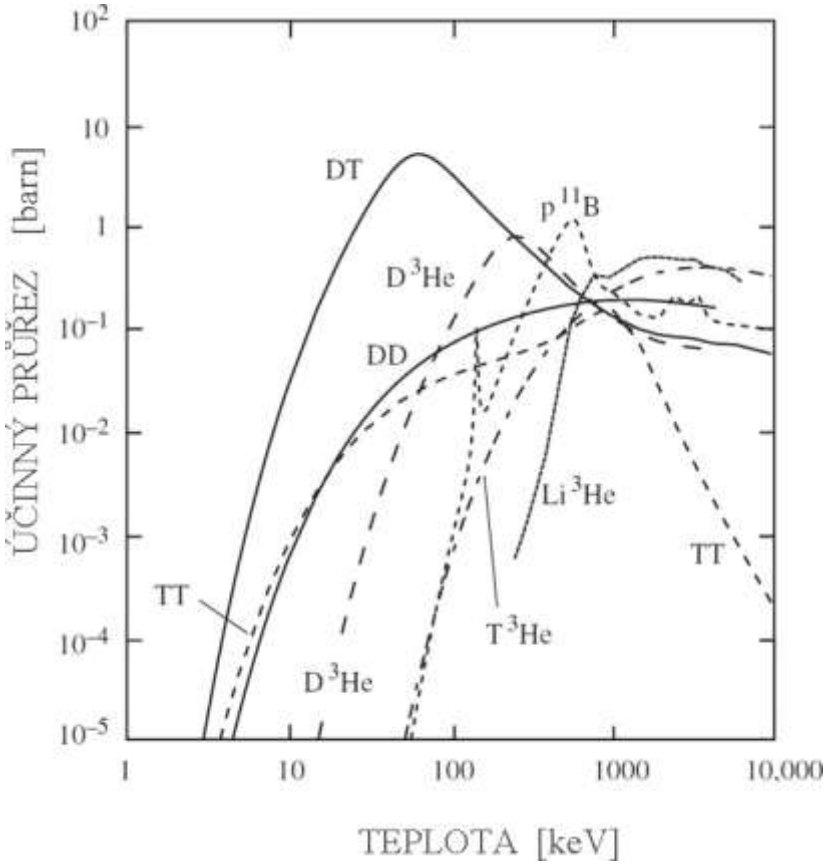
Pokud se podíváme na Obr. 3.3, který znázorňuje účinný průřez (celková pravděpodobnost interakce částic) jednotlivých izotopů lithia v závislosti na energii neutronu, zjistíme, že je podstatně vhodnější využití izotopu ^{6}Li. Předpokládá se využití obohaceného lithia s podílem 60-90 % ^{6}Li. [17]



Obr. 3.3 Účinný průřez jaderných reakcí na výrobu tritia [17]

Reakce z rov. 3.2 je zvažována především z důvodu, že by v tu chvíli odpadla výroba radioaktivního tritia. Na Zemi je ovšem izotopu ^{3}He velmi málo a je obtížně sehnatelný. Avšak tento izotop se nalézá v hojné míře na Měsíci, přibližně 500 milionů tun. A právě plánovanou měsíční těžbu oznámilo již několik zemí (USA, Rusko, Čína, Japonsko, Indie a Evropská vesmírná agentura). [1]

Poslední uvedená reakce, rov. 3.3, se používá v současné době ve většině výzkumných zařízení, především ke snadnému získání deuteria. Pro průmyslové využití se však jeví nevhodná, neboť oproti dalším dvěma variantám má malý účinný průřez v závislosti na teplotě v reaktoru (Obr. 3.4).



Obr. 3.4 Účinný průřez zvažovaných fúzních reakcí, [17]

.Momentálně se největší naděje dávají reakci D-T, avšak i u ní musí teplota dosáhnout přinejmenším 50 milionů stupňů (4,5 keV) [1]. Při této teplotě se již směs deuteria a tritia nachází ve skupenství zvaném plasma. Plasma je složená z kladně nabitých volných jader a záporně nabitých volných elektronů. Na venek se ale plasma projevuje elektricky neutrálně. Největším problémem současné pozemské termojaderné fúze je tak udržení plasmy po dostatečně dlouhou dobu. K tomu využíváme tokamaky a stelarátory. Pro vyhodnocení dostatečné udržitelnosti plasmy nám slouží Lawsonovo kritérium.

Lawsonovo kritérium nám zaručuje dostatečný výdej energie, který by vynahradil dodanou energii (vytvoření a udržení plasmy, náhrada uniknutého záření), vzhledem k teplotě v reaktoru, součinu hustoty (počet částic na jednotku objemu) a době udržení plasmy. Součin těchto tří částic musí být vyšší než konstanta pro určitou reakci. Pro reakci z rov. 3.1 platí:

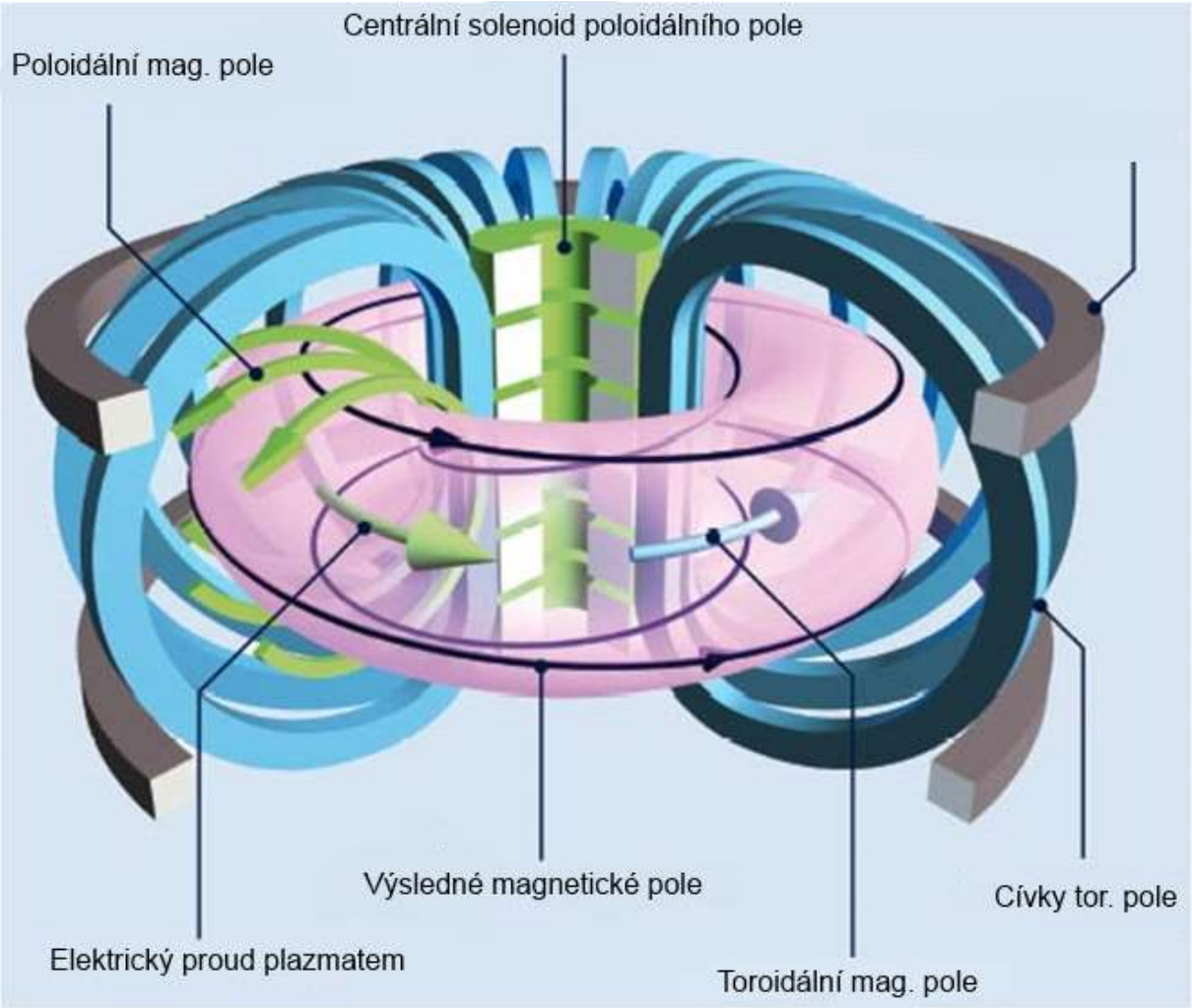
$$\mathrm{T} \cdot \mathrm{n} \cdot \tau > 5.10^{28} Ksm^{-3} \qquad 3.5$$

Uvedená hodnota se však častěji uvádí v keV.s.m^{-3}. Poté odpovídá hodnotě 4,3.10^{21} keV.s.m^{-3}[18].

Z uvedené nerov. 3.5 vyplývají dva způsoby jak dosáhnout požadované hodnoty. Prvním je udržení plasmy po dostatečně dlouhou dobu, druhým zase vysoký součin hustoty plasmy.

3.2.1 Magnetické udržení

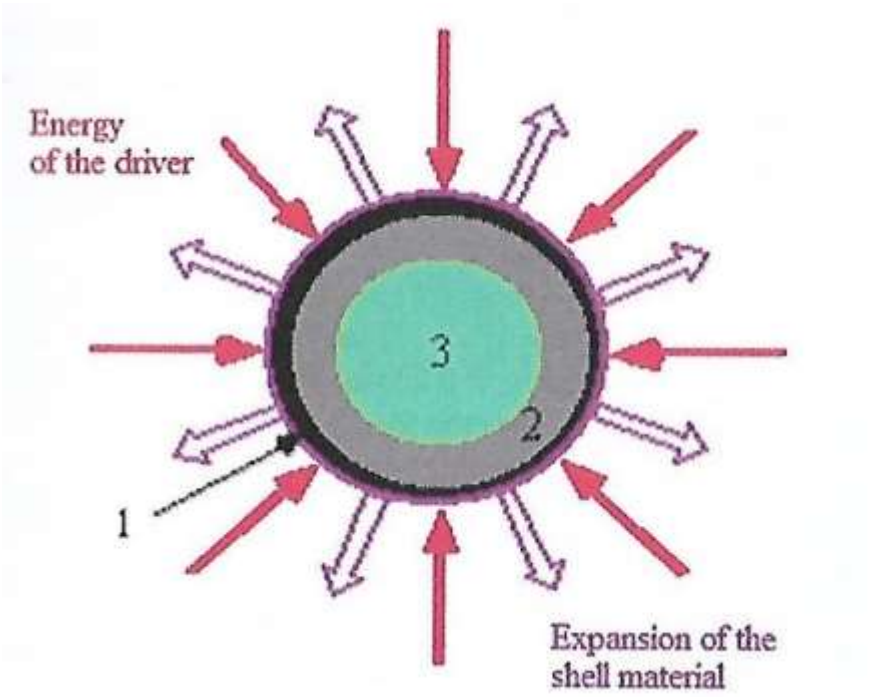
Způsob udržení plazmatu po dostatečně dlouhou dobu se nazývá magnetické udržení. Jak vypovídá název, principem je za pomocí magnetického pole udržet plasma po dostatečně dlouhou dobu, aby stihl proběhnout počet reakcí, který by uvolnil dostatečné množství energie na vyrovnání energie potřebné k zahájení fúze. Elektricky nabité částice jdou dobře ovlivňovat vnějším magnetickým polem. Putují po magnetických indukčních čarách, vytvořených vnějším magnetem. Pokud tyto čáry spojíme do kruhového tvaru (přesněji toroidální geometrie), dostaneme zařízení, které využívají jak tokamaky, tak stelarátory. V takovém případě ale nastává problém, neboť cívky vytvářející magnetické pole si budou na vnitřní straně toroidu blíže, než na vnější. To způsobí tzv. toroidální drift, kdy začnou elektricky nabité částice putovat od středu trajektorie toroidu. Tento problém se řeší přidáním poloidální složky magnetického pole. Stelarátor jej řeší přidáním sekundárních cívek, zatímco tokamaky využívají indukovaný proud v plazmatu, vytvořený primárním magnetickým polem, který následně vytváří pole poloidální. [19]



Obr. 3.5 Magnetické udržení v tokamacích [19]

3.2.2 Inerciální udržení

Oproti magnetickému udržení se způsob při vysokém součinu hustoty nazývá inerciální udržení. Jeho principem je vytvoření kulového terčíku naplněného směsí určenou k fúzi. Tento terč je následně zahříván. Požívají se iontové paprsky či lasery. Právě lasery se díky současnému vývoji stávají stěžejním nástrojem pro inerciální využití. Při zahřívání dojde k rozpínání vnější vrstvy, které tak stlačí střed terčíku a díky této kompresi dojde k zahřátí na dostatečnou teplotu pro spuštění jaderné fúze.



Obr. 3.6 Princip inerciálního udržení [1]

Ačkoliv tímto způsobem odpadá problém udržení plazmatu, vznikají další problémy. Je potřeba zajistit lasery s výkonem okolo 10^{15} W a vysokofrekvenčním módem 10-100 výstřelů za sekundu. Účinnost inerciálního udržení v současnosti dosahuje 0,3 % a měla by se dostat do rozmezí hodnot 10-15 %. Dále je potřeba zajistit přesný tvar terčíků, neboť každá odchylka je v průběhu stlačování terčíku značně zvětšována. [1]

Pro budoucí termojaderné elektrárny se však jeví způsob inerciálního udržení jako neefektivní.

3.2.3 Další způsoby získávání energie z termojaderné fúze

Pro první generace termojaderných elektráren využívající jadernou fúzi budou nositelem energie neutrony. Ty budou vyvolávat sekundární radiaci. I kvůli tomuto důvodu se začaly hledat možnosti, které by tento problém odstranily. Výsledkem by mohla být bezneutronová fúze. U takovéto fúze by celkový přenos energie neutrony neměl přesáhnout jedno procento celkové uvolněné energie. Dále by tento zdroj energie odstranil potřebnou aktivaci neutronů. Energie by byla přenášena ve formě nabitých částic. To by umožnilo přeměnu přímo na elektrickou energii namísto parního cyklu. Na Obr. 3.7 jsou uvedeny nejčastěji zvažované reakce seřazené dle účinného průřezu. Problémem jsou však výrazně vyšší teplotní podmínky pro aktivaci fúze. Například nejběžněji zvažovaná reakce, proton-bór, potřebuje aktivační teplotu až 600 keV[20]. Navíc výnos energie je oproti D-T reakci přibližně třetinový.

Reaction	
$^{2}D + ^{3}He \rightarrow ^{4}He + ^{1}p$	+ 18.3 MeV
$^{2}D + ^{6}Li \rightarrow 2\ ^{4}He$	+ 22.4 MeV
$^{1}p + ^{6}Li \rightarrow ^{4}He + ^{3}He$	+ 4.0 MeV
$^{3}He + ^{6}Li \rightarrow 2\ ^{4}He + ^{1}p$	+ 16.9 MeV
$^{3}He + ^{3}He \rightarrow ^{4}He + 2\ ^{1}p$	+ 12.86 MeV
$^{1}p + ^{7}Li \rightarrow 2\ ^{4}He$	+ 17.2 MeV
$^{1}p + ^{11}B \rightarrow 3\ ^{4}He$	+ 8.7 MeV
$^{1}p + ^{15}N \rightarrow ^{12}C + ^{4}He$	+ 5.0 MeV

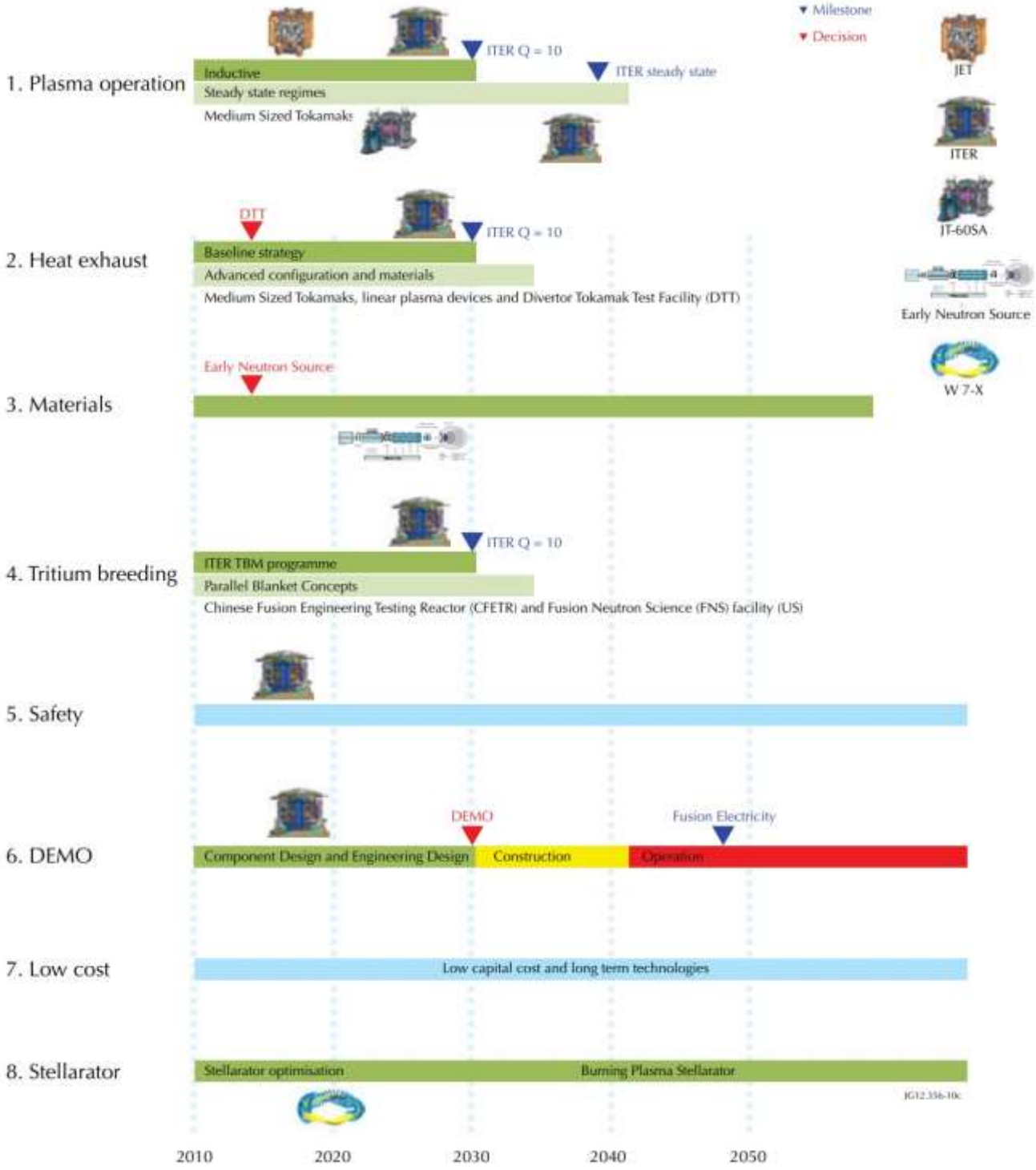
Obr. 3.7 Reakce uvažované pro bezneutronovou fúzi [20]

Mezi další potenciální zdroje energie využívající jadernou fúzi na Zemi patří jedna z nejstarších uvažovaných možností, studená fúze. Princip je založen na vložení palladiové elektrody do elektrolytu obohaceného těžkou vodou, kterou se nechá procházet slabý proud. Výsledkem několika pokusů byla vyšší teplota vody. Žádný z experimentů ale nepřinesl uspokojivé výsledky. Přesto ve studiu studené fúze pokračuje hned několik států.

3.2.4 Termojaderná elektrárna

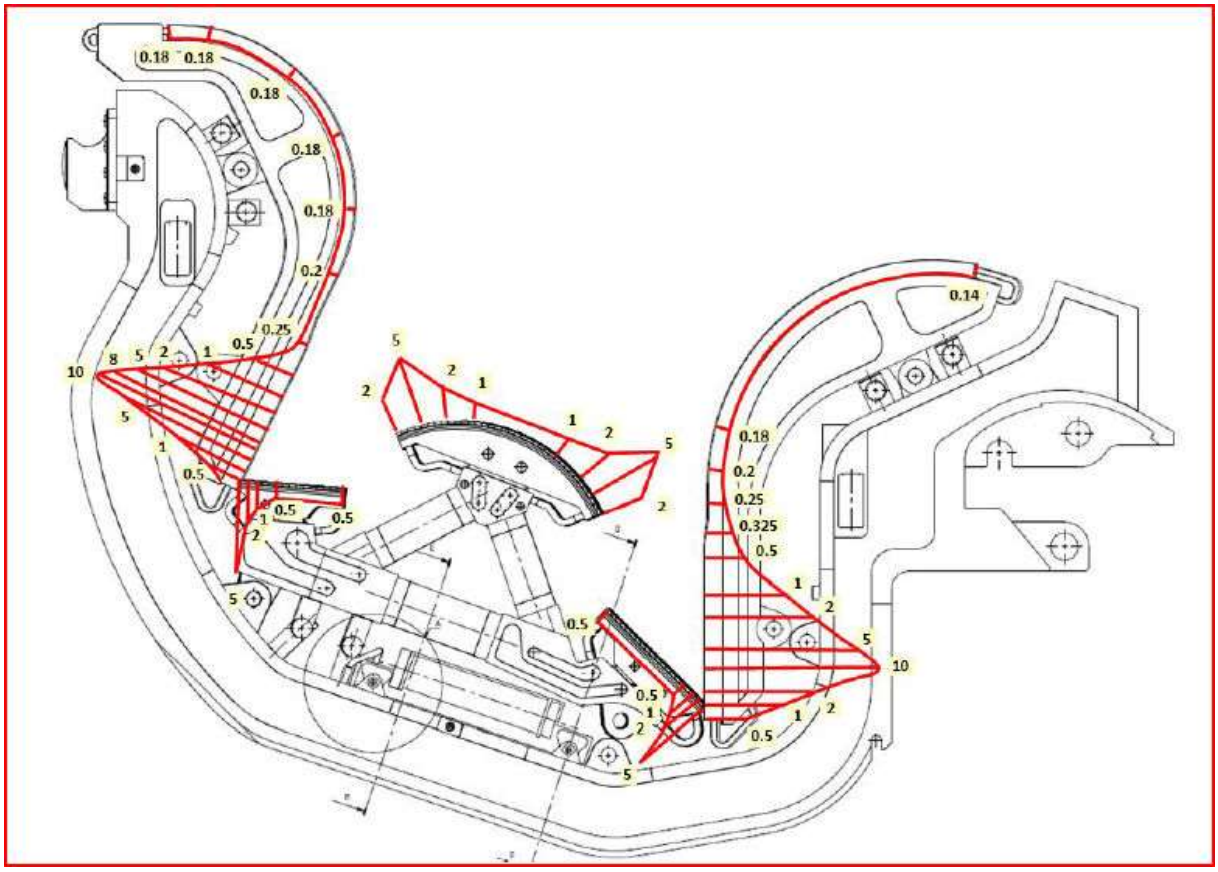
Již zmíněný projekt ITER má být posledním mezikrokem k výstavbě funkční fúzní elektrárny. Tou by se měl stát plánovaný projekt DEMO (demonstrační fúzní elektrárna). Cílem této elektrárny sice ještě nebude konkurovat ostatním komerčním zdrojům elektrické energie, přesto by měla dosáhnout hodnoty Q = 35 a více (Q je poměr uvolňovaného výkonu fúzního reaktoru k příkonu zažehnutí a ohřívání plazmatu). Dle Roadmap to the Realisation of Fusion Energy, což je dlouhodobý plán Evropské unie vedoucí k získávání elektrické energie pomocí fúze, by projektová dokumentace měla být vypracována v letech 2021-2030. DEMO by pak mělo být postaveno a zprovozněno nejdéle v roce 2050. V této studii je dále tato cesta rozpracována do osmi kroků (viz. Obr. 3.8). Pokud nedojde k výraznému objevu v jiných cestách k jaderné fúzi, bude DEMO postavěno na bázi tokamaku využívajícího D-T reakci.

Nositelem této energie budou uvolněné neutrony, které budou pronikat první stěnou reaktoru do blanketu (vnitřní obal vakuové komory). Tomu předají svou kinetickou energii a přemění ji tak na tepelnou. Dalším zdrojem tepelné energie bude divertor umístěný na dně reaktoru. Z těchto zdrojů budou přenášet energii primární okruhy až k výměníkům tepla. Zde bude teplo předáno do sekundárního okruhu. Tento okruh bude fungovat na bázi Rankinova nebo Braytonova termodynamického cyklu. Nabízí se i možnost dvojitého paroplynového cyklu. V prvním cyklu by bylo využito vysokoteplotní helium, které by přenášelo tepelnou energii na plynovou turbínu a zbylou energii parnímu cyklu s další turbínou. [17] [30]



Obr. 3.8 Dlouhodobý plán k zisku elektrické energie za využití fúze [21]

Společně s přenosem tepla bude potřeba provést souběžný výzkum materiálů pro součásti uvnitř reaktoru včetně vnitřního pláště komory. Oproti jaderným elektrárnám, kde se tepelný tok pohybuje okolo hodnoty 0,5 $MW.m^{-2}$, u fúzních reaktorů se bude tato hodnota pohybovat u nejzatíženější součásti, divertoru, v rozmezí 5 až 20 $MW.m^{-2}$. V případě různých anomálií plazmatu se tepelný tok může dostat až na hodnotu 40 $GW.m^{-2}$. Schéma tepelného zatížení divertoru pro projekt ITER je zobrazeno na Obr. 3.9. Hodnoty jsou uvedené v $MW.m^{-2}$ [15]



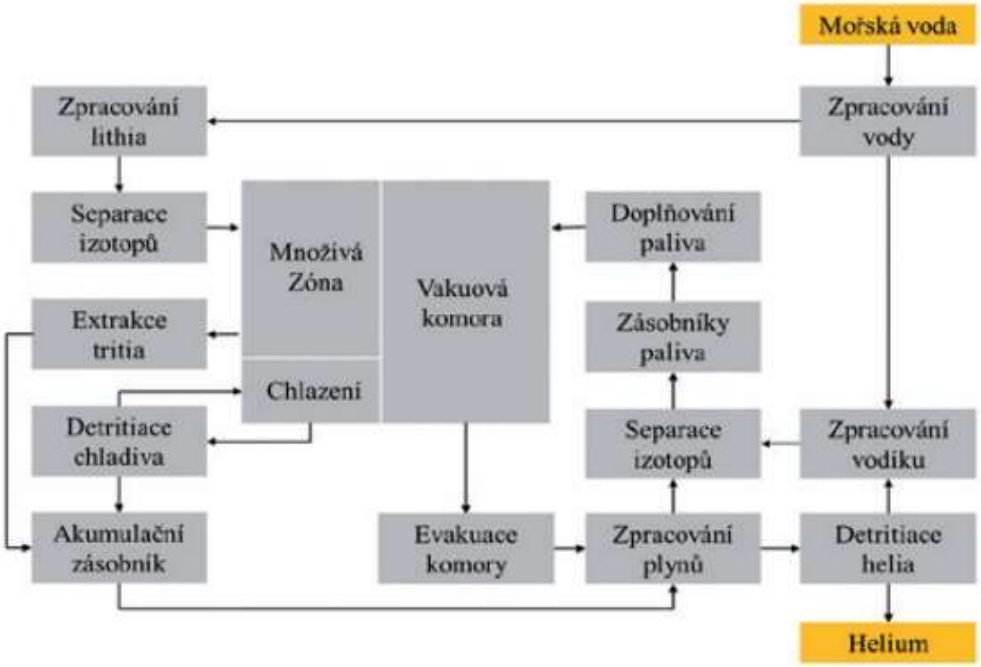
Obr. 3.9 Schéma tepelného zatížení divertoru v MW.m^{-2} [30]

Umístění a tvar divertoru jsou optimalizovány dle analýzy tvaru plazmatu a samotné vakuové komory. Obvykle toho bývá dosaženo extrapolací výsledků z jednotlivých experimentů. Divertor se standardně nachází ve spodní části komory, kde je vyšší hustota plazmatu, což pomáhá odsávací funkci divertoru. Kvůli vysokým tepelným tokům, jakým bude divertor vystavěn, jsou zvažovány slitiny grafitu, CFC (carbon fibre composites), beryllia a především wolframu. Jejich výhody a nevýhody jsou uvedené v Tab. 3.3. [2]

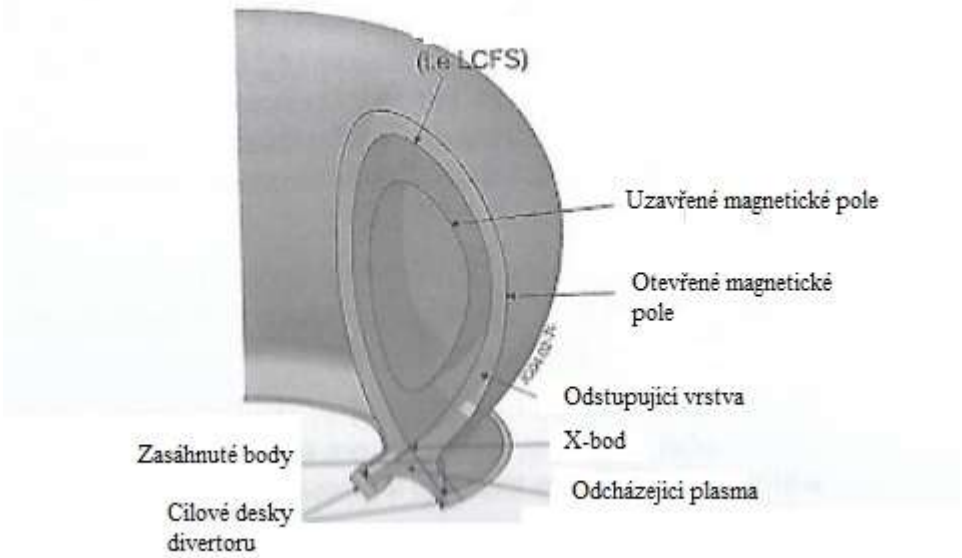
Grafit	Výhody	Vysoká teplota tavení (4043 °C), nízké nukleonové číslo, vysoká tepelná vodivost, dobré vakuové vlastnosti i při vysokých teplotách
	Nevýhody	Sublimace při teplotách vyšších než 1500 °C, obtížné připojení na měděný chladič
CFC	Výhody	Lepší tepelná vodivost a mechanické vlastnosti než grafit
	Nevýhody	Stejné jako grafit
Beryllium	Výhody	Nízké nukleonové číslo, vysoká tepelná vodivost, snadné připojení na měděný chladič
	Nevýhody	Toxická látka, snadno propouští radioaktivní záření
Wolfram	Výhody	Vysoká teplota tavení, vysoká tepelná vodivost
	Nevýhody	Velké nukleonové číslo

Tab. 3.3 Vlastnosti materiálů zvažovaných pro divertor [2]

Palivový cyklus bude probíhat dle Obr. 3.10. Z mořské vody se bude s využitím vysoké teploty reaktoru získávat deuterium a lithium. Lithium bude využito k vytváření tritia v množivé zóně. Tritium-deuteriová směs bude pro zahájení reakce v reaktoru vstřikována v plynné formě. K doplňování paliva bude sloužit peletový systém (směs deuteria a tritia bude vstřikována v podobě zmraženého vlákna až 16 kusů paliva za sekundu o délce a průměru 5 mm[17]). Nespálené palivo a odpadní helium bude odváděno pomocí divertorů. K tomu je využíváno poloidální magnetické pole, které má v této oblasti speciální konfiguraci. Zatímco v centrální oblasti plazmatu jsou siločáry magnetického pole kruhovitě uzavřeny, v oblasti divertoru jsou otevřené a protínají cílovou desku divertoru. Díky této konfiguraci, většina částic, která překročí poslední uzavřenou křivku (LCFS), bude navedena do cílové desky divertoru (Obr. 3.11). Z odvedené směsi bude následně extrahováno nevyhořelé palivo a vráceno do zásobníků. Helium bude odvedeno mimo cyklus. Tento cyklus bude využíván u první generace fúzních elektráren. U dalších generací by měl být DT cyklus nahrazen jiným, který by nevyužíval radioaktivní tritium. Tím by odpadla celá levá část Obr. 3.10.

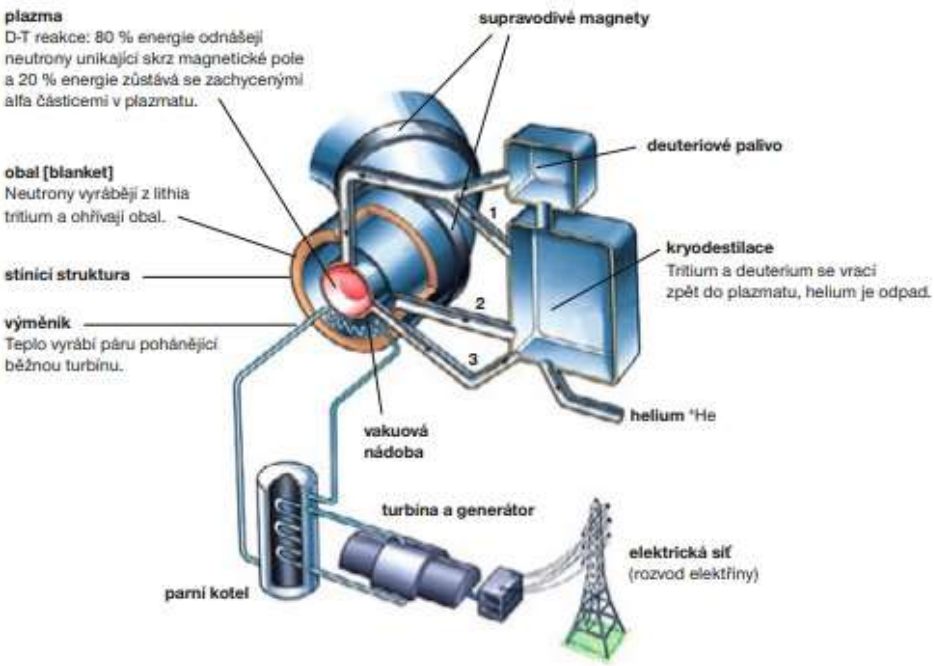


Obr. 3.10 Palivový cyklus I. generace fúzních elektráren [15]



Obr. 3.11 Princip divertoru [2]

Pro simulaci provozu fúzní elektrárny vznikl již v roce 2005 počítačový program PROCESS systém code. Ten zahrnuje dosavadní výzkum v oblasti udržení plazmatu, vytváří simulace procesů uvnitř reaktoru a zahrnuje jak nastavení režimu plazmatu, tak namáhání vnitřních komponent reaktoru. Figuruje jak v projektu ITER tak i v plánování projektu DEMO.

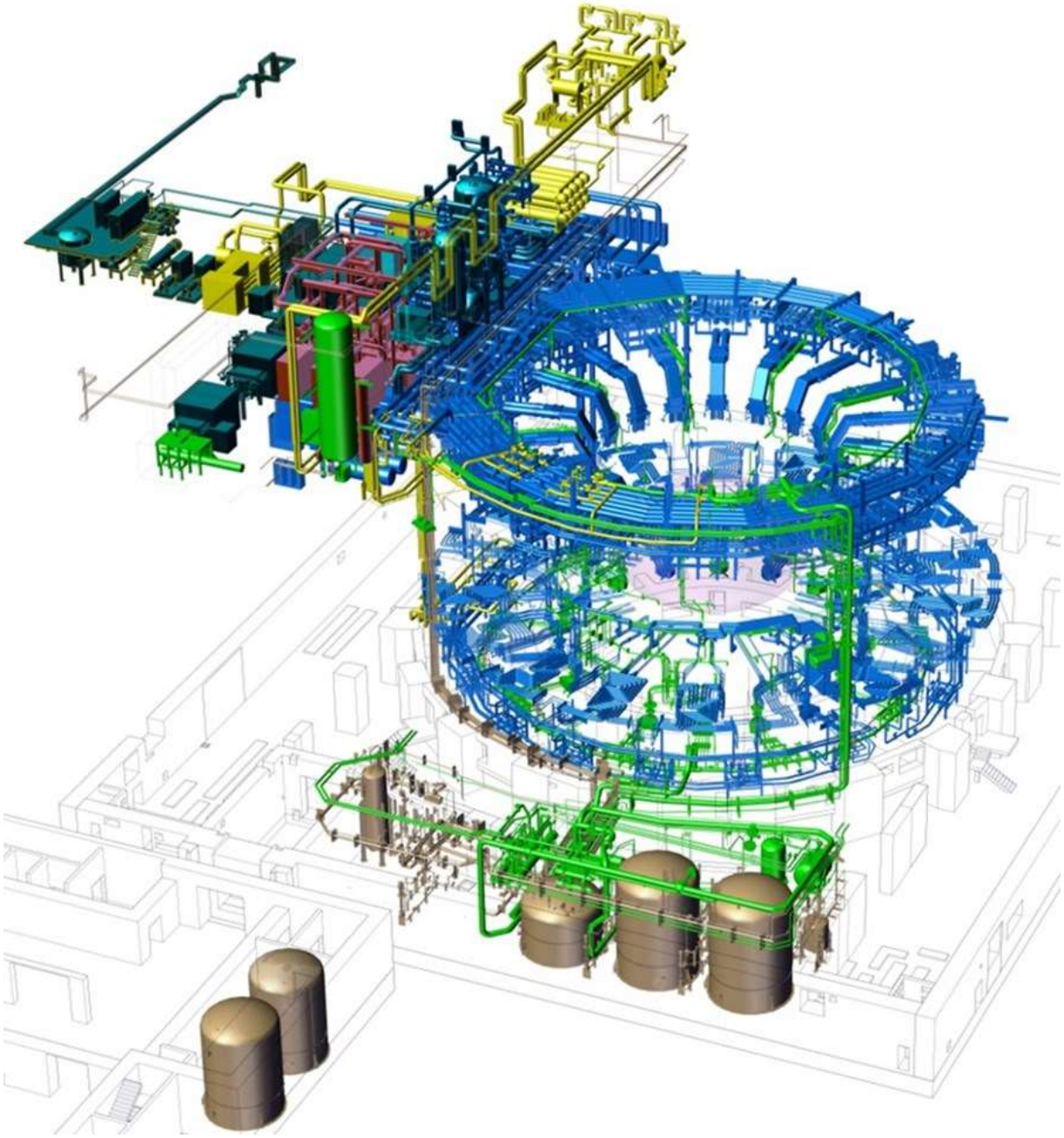


Obr. 3.12 Schéma fúzní elektrárny I. generace [4]

Dalším problémem, který bude nutné vyřešit, je chlazení. Kromě blanketu a divertoru bude nutné chladit i další komponenty elektrárny. Systém dodatečného ohřevu plazmatu, systém current drive, kryogení systém supravodivých magnetů, divertory a generátory energie k cívkám. Každý z těchto komponent elektrárny bude pracovat ve specifických podmínkách a je proto nutné využívat různá chladící media. Proto celkový chladicí systém bude rozdělen

do několika chladicích okruhů napojených na otevřený Systém odebírání tepla (HRS). Na odvádění tepla generovaného plazmatem bude sloužit chladící vodní systém tokamaku (TCWS). Ten předá teplo intermediálním komponent chladícího vodního systému (CCWS) a ten následně právě HRS. Na Obr. 3.13 se nachází celé chladící schéma projektu ITER. [30]

Mezi zvažovaná chladící media připadají: tekutý dusík, tekuté helium, voda a tekutý kov LiPb. Odpověď na otázku, jaké medium použít pro daný úsek elektrárny, by měl dát projekt ITER.V jedné části pláště tokamaku bude nainstalována výměnná část, do které se budou zasouvat kapsle s různými chladícími medii. Tak budou získávány informace pro chladící medium blanketu. Supravodivé cívky budou chlazeny tekutým heliem pro jeho velmi nízkou teplotu. Výsledky projektu ITER budou posléze využity pro projekt DEMO.



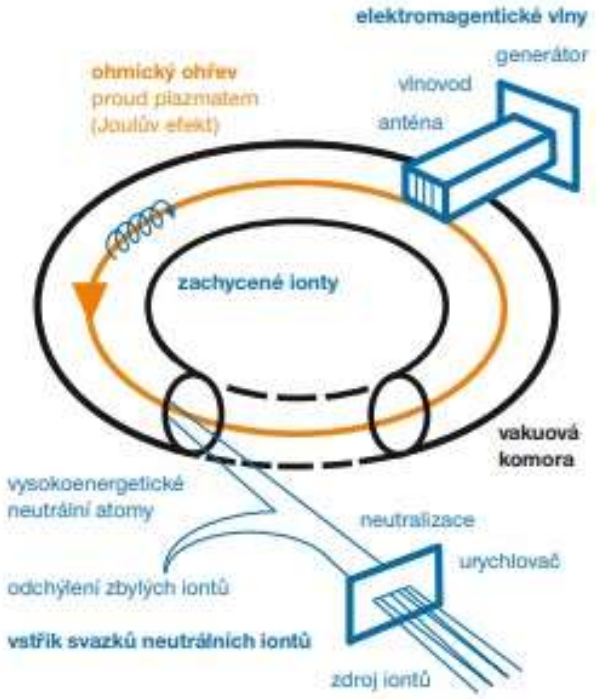
Obr. 3.13 Schéma chladicího systému projektu ITER [31]

4 Tokamaky

4.1 Princip tokamaku

Princip tokamaku je založen na zažehnutí plazmatu ve vnitřní vakuové komoře. Tokamaky využívají magnetické udržení, které zde funguje jako trubice, kterou proudí plasma. Tato schopnost zabraňuje doteku plasmy s povrchem komory a tím brání jejímu poškození. Primární magnetické cívky vytváří toroidální magnetické pole o hodnotách B=1 až 10 T[4]. Toto magnetické pole indikuje elektrický proud v plazmatu, který následně vytváří poloidální pole, jehož hodnoty jsou oproti toroidálnímu přibližně stokrát menší. Součástí tokamaku jsou také sekundární cívky, jež slouží ke kontrole a udržování poloidálního pole.

Neboť jako zdroj sekundárního vynutí slouží vodíkový plyn uvnitř vakuové komory, funguje tak jako jediný závit. Tento plyn je tak díky velkému odporu rychle ohříván Jouleovým teplem a stává se z něj plasma. Současné tokamaky však nedosahují vysokých teplot po dostatečně dlouhou dobu, proto využívají dodatečné způsoby ohřevu. Prvním z těchto způsobů je dodatečné zvýšení tepla za použití absorpce elektromagnetického vlnění (ionty o rezonanční frekvenci 20 až 120 MHz a elektrony o frekvenci 70 až 200 GHz). Vlnění lze přenést do vakuové komory zvenčí za pomoci vlnovodů a antén umístěných na stěnách komory. Toto vlnění může být při vhodném využití použito i pro odstranění nestability plazmatu Dalším způsobem je dodání teploty za pomocí injektorů neutrálních svazků. Neutrální svazky atomů vodíku jsou u tohoto způsobu vstřikovány do plazmatu, kde předávají svou kinetickou energii za pomocí srážek. Současně lze tato metoda použít jako částečný způsob doplňování paliva. Oba tyto způsoby jsou zobrazeny na Obr. 4.1. Tyto metody budou pravděpodobně využívány současně. [4] [15]

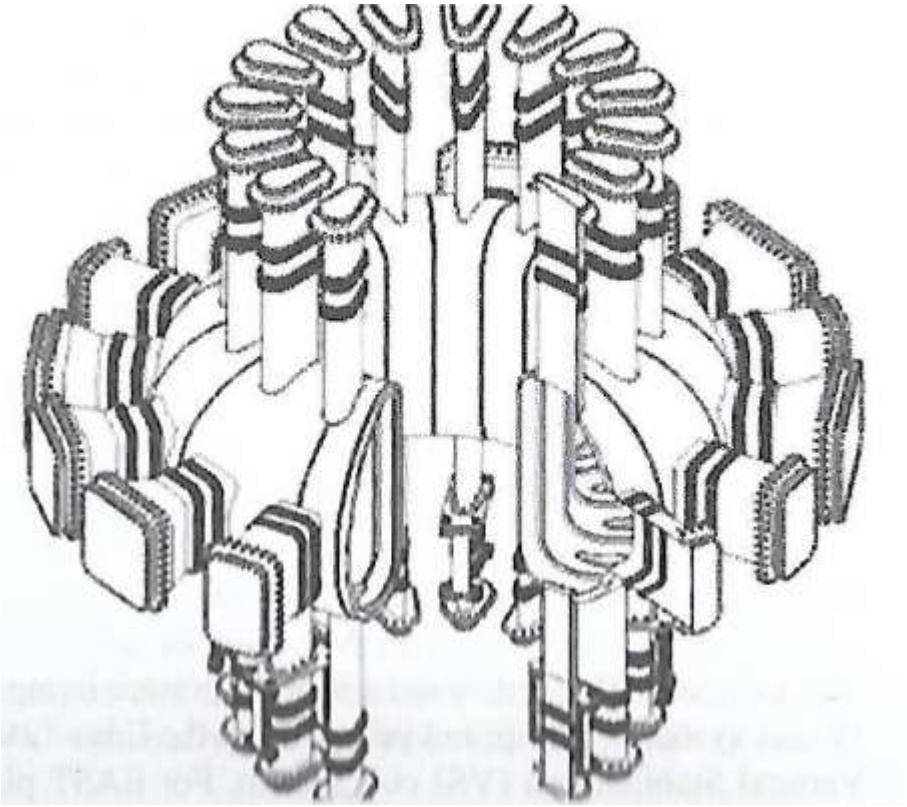


Obr. 4.1 Metody ohřevu plazmatu v tokamacích [4]

Dalším současným problémem tokamaků je nasycení transformátorového jádra, u kterého dochází k přeorientování na vnější magnetické pole, a tak dochází k útlumu proudu

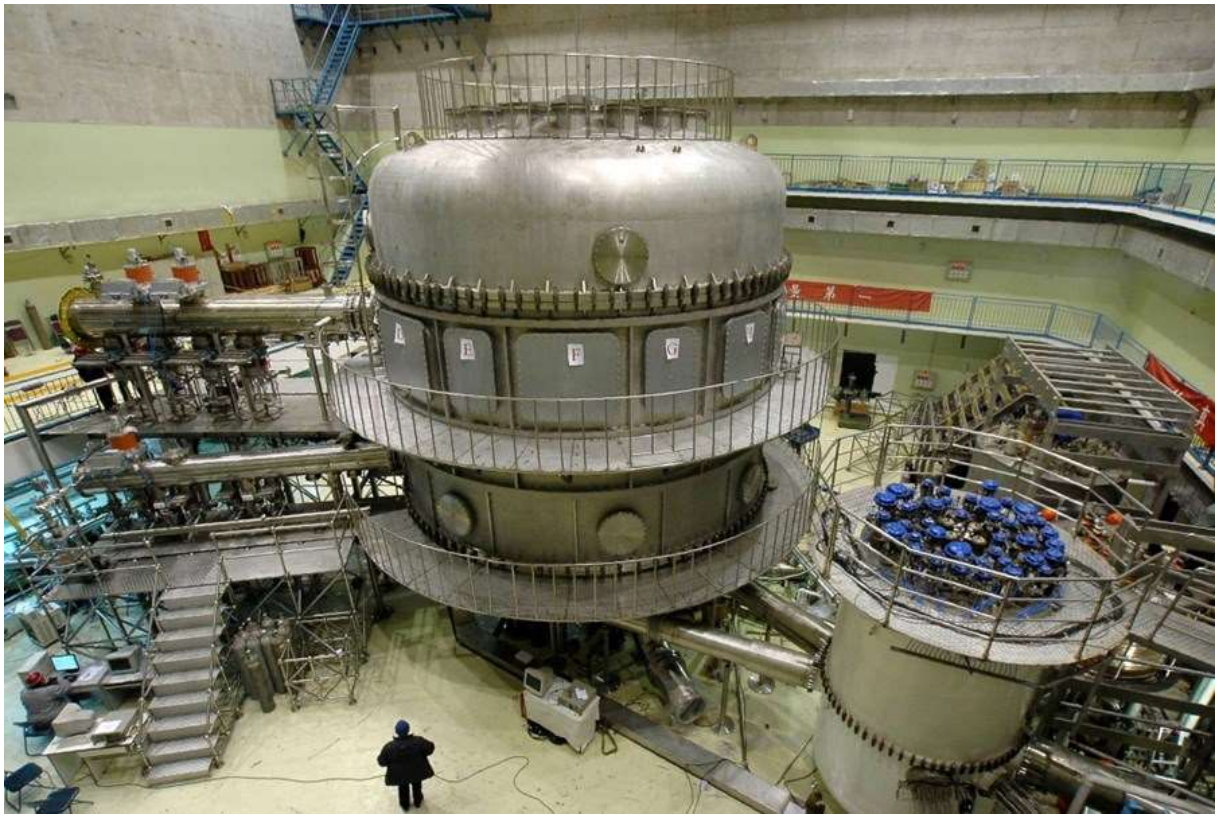
v plazmatu. K tomuto dochází kvůli využití stejnosměrného proudu. Proto se pro fúzní elektrárny předpokládá pulzní systém trvající přibližně dvě a půl hodiny a následným patnácti minutovým restartem indukčního systému [15]. Při něm se bude využívat technologie označovaná jako Current drive, neboli Neinduktivní generaci vlečení proudu. Za pomocí vysokofrekvenčního elektromagnetického vlnění je vytvářen ustálený proud částic v plazmatu v jednom směru.

Jednou ze stěžejních částí tokamaku je samotná vakuová komora. Na Obr. 4.2 je zobrazena vakuová komora tokamaku EAST, který se nachází v městu Hefei v Číně. Nejčastěji je hlavní komora dvouplášťová, používají se ale i jednoplášťové. Vakuová komora slouží k vedení plazmatu, zadržení uvolněných neutronů a pro umístění vnitřně-reaktorových součástí. Skládá se z hlavní komory, otvorů pro propojení vnitřních a vnějších součástí fúzního reaktoru a z podpůrných částí. Pro snížení neutronové radiace a k chlazení stěn reaktoru se mezi dvěma plášti tokamaku EAST nachází chladicí kapalina (voda), přiváděná vstupním potrubím. [2]



Obr. 4.2 Vakuová komora tokamaku EAST [2]

Další důležitou součástí je kryostat. Jeho funkcí je vytvoření vakuového prostředí, odstranění vnějšího tepelného zatížení chlazením vodičů v cívkách a propojení magnetického systému s vakuovou komorou. Je tvořen pomocí nerezové oceli, jako plně svařená nádoba. Na Obr. 4.3 je zobrazen kryostat tokamaku EAST. [2]



Obr. 4.3 Kryostat tokamaku EAST [22]

U tokamaků rozdělujeme režim H-mode, kde se pomocí divertorů vytváří teplotní bariéra, která vzniká potlačením turbulence plasmatu, a režim L-mode s vyšším únikem tepla a částic.

4.2 Tokamak COMPASS

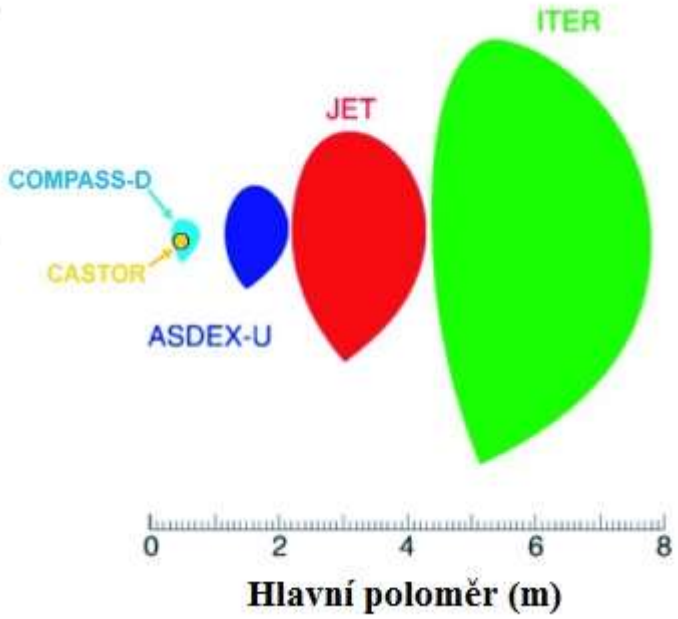
COMPASS je tokamak, navržený a poprvé zprovozněný v 90. letech minulého století v Culhamu pod záštitou United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA). V roce 2004 byl nabídnut Evropskou komisí a UKAEA Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd České republiky. Zde je v provozu od roku 2008, kdy nahradil dosavadní sovětský tokamak CASTOR.

Svými rozměry patří mezi menší tokamaky schopné dosáhnout režimu H-mode. Parametry tokamaku jsou popsány na Obr. 4.4. Tokamak je zajímavý především tím, že je geometricky podobný plánovanému tokamaku ITER, přibližně desetinový. Takovouto geometrickou podobnost mají v Evropě už pouze tokamaky JET a německý tokamak ASDEX Upgrade (porovnání velikostí na Obr. 4.5). Vakuová komora tokamaku COMPASS je ve tvaru D. Využívá programový systém Codac.

Hlavní náplní výzkumu na tokamaku COMPASS je přechod mezi L a H modem, vytváření vhodné konfigurace magnetického pole (tokamak využívá systém až 35 poloidálních cívek) a především únik energie na hranicích plazmatu (zde uniká kvůli kinetickému tlaku plazmatu většina energie). [4]

COMPASS	
Hlavní poloměr vakuové komory	0,56 m
Vedlejší poloměr komory v horizontálním směru	0,2 m
Vedlejší poloměr komory ve vertikálním směru	0,35 m
Plazma udržující magnetické pole	0,8–2,1 T
Proud plazmatem	< 400 kA
Délka ohmického výboje	< 0,5 s
Ohmický příkon	< 500 kW
Příkon dodatečného ohřevu dvěma svazky neutrálních atomů s energií částic 40 keV	2 × 300 kW
Příkon pro neinduktivní generaci proudu (plánován pro pozdější fázi výzkumu)	2 × 300 kW
Doba udržení energie plazmatu	5–10 ms
Maximální hustota plazmatu v centru komory	< 10^{20} m^{-3}
Maximální teplota elektronů v centru komory	< 1,5 keV
Maximální teplota iontů v centru komory	< 1,5 keV

Obr. 4.4 Parametry tokamaku COMPASS [4]



Obr. 4.5 Porovnání tokamaků s geometrickou podobností s tokamakem ITER [23]

4.3 Tokamak JET

The Joint European Torus (JET) je tokamak nacházející se ve městě Culham ve Velké Británii. Navržen byl v roce 1973 a o deset let později byl uveden do provozu. JET je v současnosti největší a nejvýkonnější tokamak na světě. Dle Roadmap to the Realisation of Fusion Energy (Obr. 3.8) je tokamak JET posledním výzkumným krokem k tokamaku ITER.

JET	
Hlavní poloměr	2,96 m
Vedlejší poloměr – horizontální	1,25 m
Vedlejší poloměr – vertikální	2,10 m
Magnetické pole	3,45 T
Objem plazmatu	≈ 100 m³
Typický proud kruhovým plazmatem	3,2 MA
Typický proud plazmatem tvaru D	4,8 MA
Doba stacionární části výboje	typicky 20 s, max 60 s
Dodatečný ohřev – svazek rychlých neutrálních částic	35 MW
Dodatečný ohřev – iontová cyklotronní rezonance	32 MW
Dodatečný ohřev – dolní hybrid	12 MW

Obr. 4.6 Parametry tokamaku JET [4]

Vakuová komora tokamaku JET je ve tvaru písmene D. Využívá pokročilé divertory typu Mark. Byla zde také vyzkoušena výměna částí divertoru za využití robotické paže (Obr. 4.7). Jeho hlavní poloměr má velikost 2.96 m a objem plazmatu odpovídá přibližně hodnotě 100 m^3 (viz Obr. 4.6). V roce 2011 byla dokončena přestavba vnitřních stěn nádoby, aby použité materiály (beryllium a wolfram) odpovídaly těm v plánovaném tokamaku ITER. Využívá dodatečné způsoby zvýšení tepla, jak za pomocí absorpce elektromagnetického vlnění, tak vstřiku neutrálních svazků.

Obr. 4.7 Výměna částí divertoru v tokamaku JET [24]

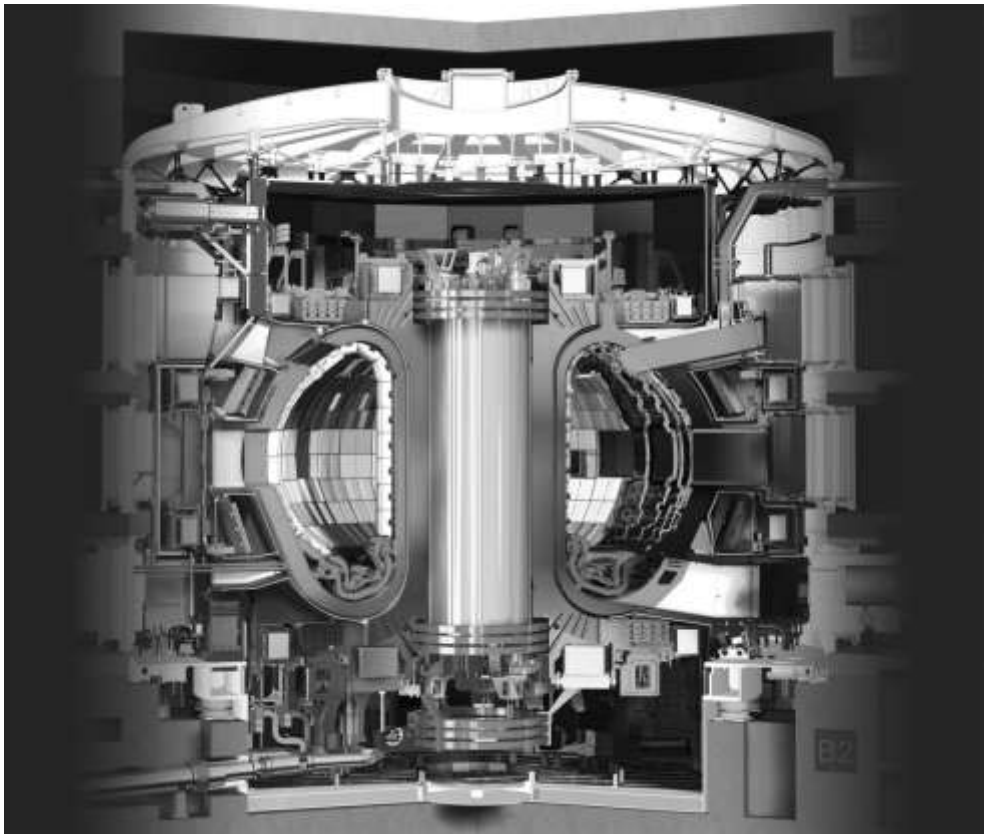
V roce 1985 dosáhl tokamak JET proudu 5 MA plazmatem. V roce 1988 překonal vlastní rekord na hodnotu 7 MA. Mezi další prvenství patří funkční fúzní reakce D-T, kdy dosáhl JET výkonu 1,7 MW při teplotě 200 000 000 °C. S použitím reakce D-T a nejnovějšími technologickými prvky dosáhl tokamak JET v roce 1997 výkonu 16 MW a při jediném výboji vyprodukoval 22 MJ energie. S příkonem 24 MW tak dosáhl rekordního poměru Q=0,67. [4]

Po více než třicetiletém provozu je tokamak JET stále vůdčím projektem na poli termojaderné fúze. Využívá ho okolo 350 vědců z celé Evropy a dalších z celého světa.

4.4 Projekt ITER

International Thermonuclear Experimental Reactor, zkráceně ITER, je plánovaný projekt největšího tokamaku na světě, poslednímu kroku k postavení demonstrační termojaderné elektrárny DEMO. Zkratka ITER znamená zároveň v latině „cesta“, což má symbolizovat cestu k jaderné fúzi. Nápad na postavení tohoto tokamaku vznikl v roce 1987 v Ženevě. Po dlouhodobém vyjednávání bylo dohodnuto, že se tokamak ITER postaví ve francouzském Caradache, přibližně 100 km severně od Marseille. Výstavba začala v roce 2013 a její dokončení je naplánováno na rok 2020. Na projektu se podílí Evropská unie, Indie, Čína, Rusko, Jižní korea, Japonsko, Spojené státy americké a od roku 2016 také Austrálie.

V letech 2020-2030 by měl ITER postupně dosáhnout výkonnostního poměru Q = 10. Během této doby se budou testovat různé režimy udržení plasmy, prvně na D-D reakci, později za využití reakce D-T. Dále bude součástí výzkumu získávání tritia z lithia přímo v blanketu fúzního reaktoru. Dále pak přechod do stacionárního provozu. V letech 2030-2040 by se měly zkoumat technologické možnosti z hlediska použití materiálů, možnosti robotické výměny vnitřně reaktorových komponent a pokročilé způsoby režimů operace plazmatu.



Obr. 4.8 Tokamak ITER [25]

Hlavní poloměr plazmatu bude dosahovat hodnoty 6,2 m, celkový objem plazmatu bude 840 m^3. Teplota bude dosahovat pro optimální reakci D-T hodnoty 150 milionů stupňů Celsia (10x větší než teplota v jádru Slunce) a výkon tokamaku ITER bude v hodnotách okolo 500 MW, při použití půlgramové směsi deuteria a tritia. Celý tokamak bude vážit až 23000 t. [25]

Magnetické pole bude zajišťovat 18 cívek toroidálního pole, 6 cívek poloidálního pole a centrální solenoid, skládající se z šesti nezávisle napájených modulů. Cívky budou vytvořeny ze supravodivého materiálu Nb_3Sn. U tohoto materiálu se začíná projevovat supravodivost při 18,3 K. Nb_3Sn dosahuje hustoty elektrického proudu 1000 $A.mm^{-2}$ při teplotě 4,2 K a magnetickém poli 15 T. Chlazení bude zajišťovat 31 napáječů, dodávajících chladicí kapalinu a kryostat, největší vakuová nádoba na světě. Kryostat tokamaku ITER bude mít rozměry 31 m na výšku a 36,5 m na šířku s celkovým objemem 16000 m^3. Supravodivé magnety se tak dostanou na teplotu 4 K. [4] [25]

Tokamak bude používat dodatečné způsoby zvýšení tepla, jak za pomocí absorpce elektromagnetického vlnění, tak vstřiku neutrálních svazků.

Celkové náklady na stavbu tokamaku ITER by měly dosáhnout 13 miliard eur. Evropská unie by měla uhradit okolo 45,5 % veškerých nákladů.

5 Stelarátory

5.1 Princip stelarátoru

Stelarátor (z anglického „stellar“ = „hvězdný“) je zařízení pro udržení plasmy za účelem provozu termojaderné fúze. Využívá magnetické udržení, avšak oproti tokamakům, stelarátory využívají jako zdroj poloidálního pole sekundární cívky. Díky tomuto nesdílí stelarátory problémy s proudovými nestabilitami, které vznikají jako důsledek transformátorového efektu u tokamaků. Tento způsob tak umožní udržení plazmatu po dostatečně dlouhou dobu, aby se zahřálo na teplotu vhodnou pro dosažení termojaderné fúze. Délka výboje je zde omezena pouze zahříváním cívek a u těch supervodivých tak trvá výboj až 30 minut.

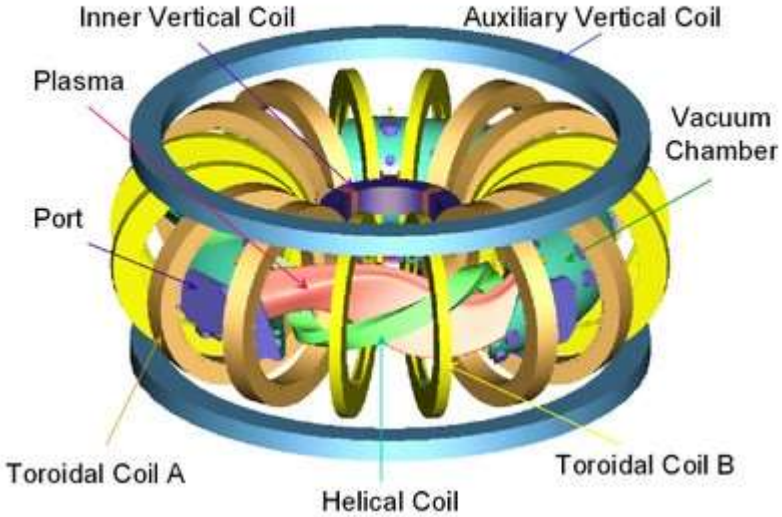
Nevýhodou stelarátorů jsou značné požadavky na výstavbu. Vakuová komora a cívky jsou zde značně upraveny do tvarů, které zaručují stejné magnetické podmínky ve všech místech komory. Výpočetní technologie dosáhly dostatečné úrovně pro navrhnutí tvaru komory a cívek až na konci devadesátých let. I kvůli tomu je výzkum stelarátorů stále na začátku a tokamaky mají momentálně navrch.

Cílem magnetického pole je snížit transport energie napříč plazmatem. Zde se projevuje další nevýhoda stelarátorů, neboť s intenzivnějším magnetickým polem tento transport roste.

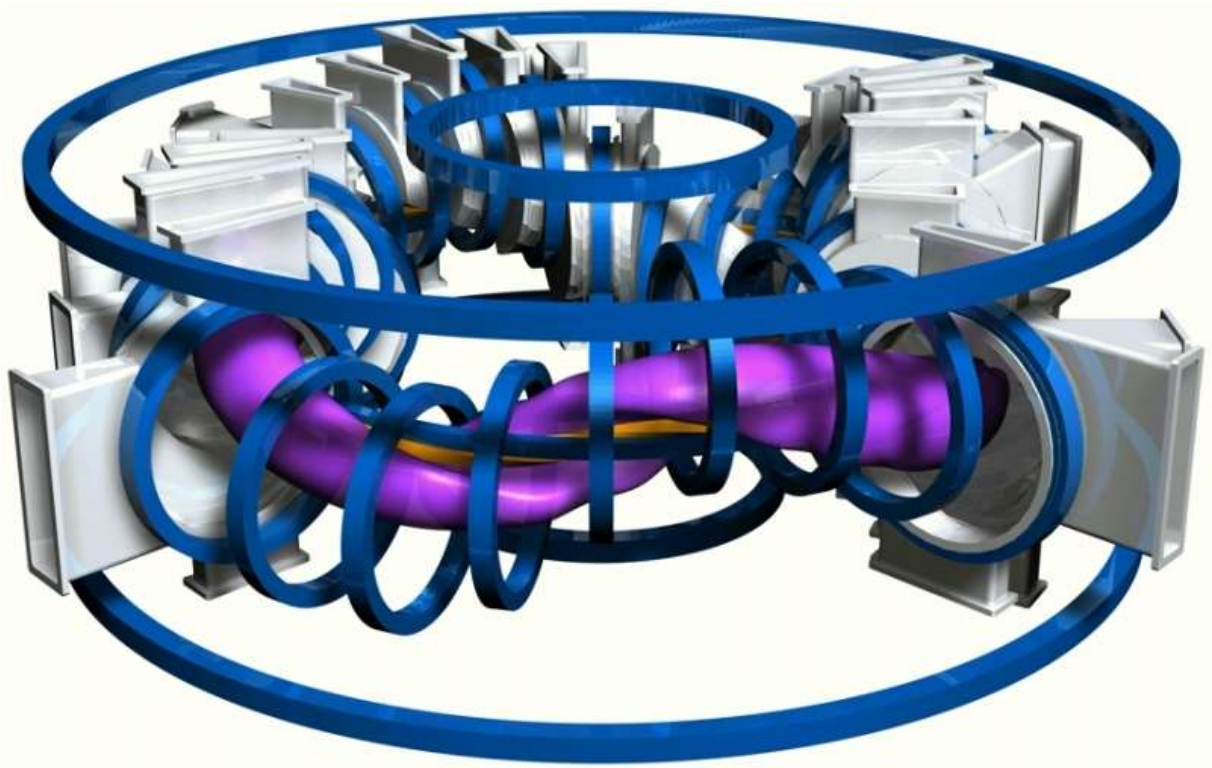
Stelarátory, stejně jako tokamaky, využívají aditivních zdrojů zvyšování teploty a to jak za pomoci absorpce elektromagnetického vlnění, tak vstřiku neutrálních svazků.

Stelarátory existují v několika modifikacích. Původní Spitzerův stelarátor byl postaven do tvaru osmičky, jako jeden z prvních návrhů, jak uzavřít vakuovou komoru. Další modifikace se dají rozdělit následovně:

1. Heliotron – využívá kromě spirálovitých cívek i několik párů poloidálních cívek pro zajištění vertikálního pole (Obr. 5.1), tento systém využívá stelarátor LHD v Japonsku
2. Modulární stelarátor – využívá sadu oddělených cívek společně se zakroucenou toroidální cívkou (HSX v USA)
3. Heliac – využívá kruhových rovinných cívek za použití složitější geometrie (Obr. 5.2), tento systém využívá australský H-1NF a španělský TJ-II
4. Helias – tento systém využívá Wendelstein 7-X [26]



Obr. 5.1 Schéma heliotronu [26]



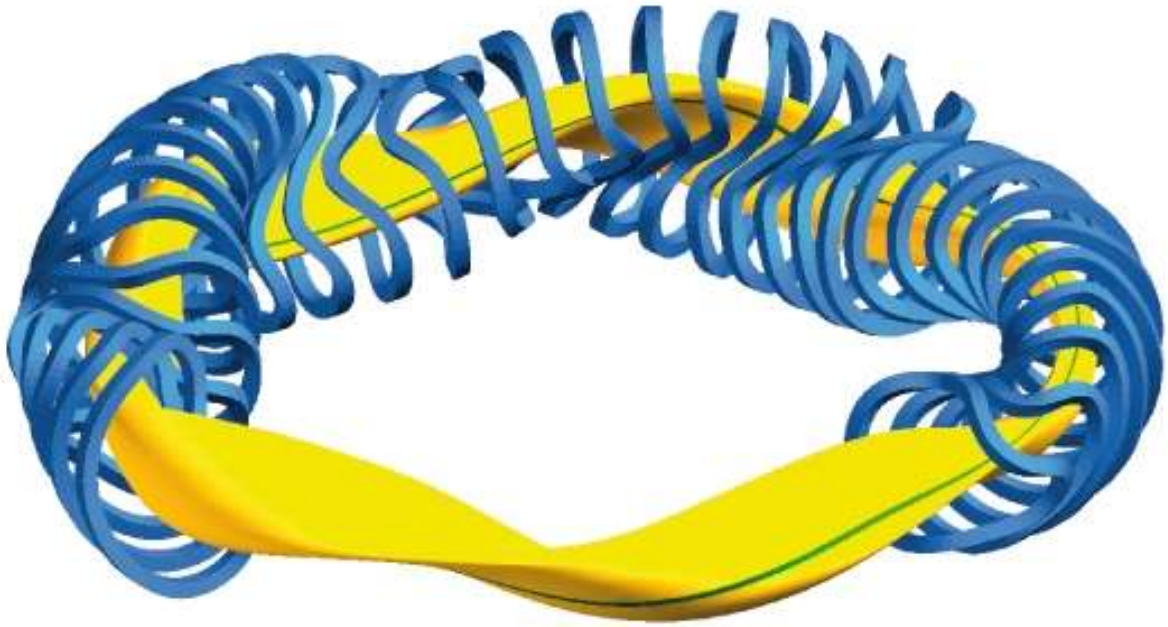
Obr. 5.2 Schéma heliacu [27]

5.2 Wendelstein 7-X

Wendelstein 7-X, zkráceně W7-X, je současný největší fúzní reaktor na bázi stelarátoru, nacházející se ve městě Greifswald v Německu, pojmenovaný dle alpského vysokého štítu. Provozuje ho Max Planck Institute of Plasma Physics (IPP). Vychází ze stelarátoru W7-AS. Založení projektu bylo vyjednáno již v roce 1994. Dokončen byl po několika odloženích

v říjnu 2015. Výstavba W7-X byla financována ze 72 % Spolkovou republikou Německo, země Meklenbursko 8 % a 20 % z fondů Evropské Unie.

W7-X je stelarátor typu helias. Tento typ využívá speciálně tvarované cívky k dosažení vysokoteplotní plasmy. Na Obr. 5.3 jsou cívky zobrazeny modrou barvou, žlutou pak samotné plasma. Magnetický systém sestává z 20 planárních a 50 neplanárních „3D“ supervodivých cívek. Tento systém umožňuje intenzitu plazmatu 3.10^{24} částic na metr krychlový a teplotě 60-130 milionů kelvinů. Cívky jsou chlazeny tekutým heliem, pomocí kryostatu, až k teplotě 4 K. Magnetické pole dosahuje hodnot 3 T. Hlavní poloměr stelarátoru je 5,5 m, vedlejší pak 0,53 m. Vakuová komora je složena z 20 částí a obsahuje 254 portů, sloužících k zahřívání a diagnostiku plazmatu. Objem plazmatu je 30 m^3. [28]



Obr. 5.3 Schéma heliasu [29]

Časový plán projektu W7-X je rozdělen do několika částí. OP1.1 (operational phase) začala 10. prosince 2015 a spočívala v testování nejdůležitějších částí stelarátoru. Dále bylo v této fázi vyzkoušeno více než 300 výbojů se směsí helia, především za účelem vyčištění komory a tak i dosažení vyšších teplot plazmatu. 3. února 2016 pak byl slavnostně zahájen první výboj na bázi vodíkového plynu. Těchto výbojů bylo provedeno více jak 2000 a teplota plazmatu dosáhla 100 milionů kelvinů. OP1.2 začala v červnu roku 2017 při testování nechlazených divertorů. OP2 pak předpokládá testování chlazených divertorů. [28]

ZÁVĚR

Využití termojaderné fúze v energetice je stále sice v nedohlednu, přesto informace uvedené v této bakalářské práci mohou čtenáři přiblížit současné poznatky o této technologii a navíc díky interpretaci Roadmap to the Realisation of Fusion Energy přiblížit budoucnost energetiky na poli termojaderné fúze. Termojaderná elektrárna založená na projektu DEMO by mohla být realitou již v roce 2050, což by vzhledem k současné energetické situaci byl dostatečný způsob nahrazení fosilních paliv, které dojdou do té doby. S využitím dalších zde uvedených technologií, jako např. bezneutronová fúze, je fúzní energetika velmi perspektivní zdroj energie v budoucnosti, jak z pohledu ekonomického, tak ekologického. S tím, že nám zásoby paliva vydrží déle, než je pravděpodobná „životnost“ naší planety.

Dále je v práci uvedeno:

- vznik a objev fúze
- fúze v přírodě
- způsoby udržení plazmatu
- princip tokamaků a nejdůležitější projekty
- princip stelarátorů a projekt W7-X

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] USHAKOV, V. Y. Electrical power engineering. 1. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 978-3-319-62300-9.

[2] SONG, Y., et al. Tokamak engineering mechanics. 1. New York: Springer, 2013. ISBN 978-3-642-39574-1.

[3] CHANDRASEKHAR, S. An introduction to the study of stellar structure. [Republication]. New York: Dover, 1958. ISBN 978-048-6604-138.

[4] MILAN ŘÍPA ... [ET AL.]. *Řízená termojaderná syntéza pro každého*. Praha: Ústav fyziky plazmatu AV ČR, 2004. ISBN 8090272479.

[5] Vazebná energie jádra. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/799-vazebna-energie-jadra

[6] Proton-protonový cyklus. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Proton-protonov%C3%BD_cyklus

[7] JANDA, Martin. Blízká i vzdálená budoucnost vesmíru. *21. století*. 2018, (4), 46-48.

[8] Triple-alpha process. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Triple-alpha_process

[9] Trpaslík, který zvládá nukleární fúzi. *21. století*. 2017, (10), 31.¨
EDDINGTON, Arthur Stanley. *The internal constitution of the stars*. New York: Cambridge University Press, 1988. ISBN 0-521-33708-9.

[10] ŘÍPA, Milan. *Historie výzkumu řízené termojaderné fúze* [online]. 2014 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: http://www.vedakolemnas.cz/miranda2/export/sitesavcr/data.avcr.cz/academia/vedakolemnas/sys/galerie-download/vkn_14_web.pdf

[11] Mark Oliphant. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Mark_Oliphant

[12] Tsar Bomba. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Tsar_Bomba

[13] 1 JADERNÁ TABLETA = 880 KG UHLÍ. *Cez* [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/tableta_6.html

[14] ENTLER, Slavomír. Jaderná fúze – budoucnost energetiky. *Institute of plasma physics of the Czech academy of sciences*[online]. [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://www.ipp.cas.cz/miranda2/export/sitesavcr/ufp/ufp-v-mediich/Publications/Jaderna-fuze-budoucnost-energetiky.pdf

[15] BENEŠ, Ivan. Současná energetická situace v globálním pohledu. In: *Portal.chmi* [online]. Praha, 2008 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/katastrofy/18zasedani/cnvonk080605benesshort.pdf

[16] ENTLER, Slavomír, Jan MLYNÁŘ a Václav DOSTÁL. Základy fúzní energetiky V. – Výroba elektřiny. *Tzbinfo* [online]. Ústav fyziky plazmatu AV ČR, Ústav energetiky Fakulty strojní ČVUT, 2016 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z:

https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/14704-zaklady-fuzni-energetiky-v-vyroba-elektriny

[17] Lawsonovo kritérium. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/816-lawsonovo-kriterium

[18] Fúze, to není jen vtip III: Magnetické udržení. *ATOMinfo* [online]. 2014 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: http://atominfo.cz/2014/02/fuze-to-neni-jen-vtip-iii-magneticke-udrzeni/

[19] Aneutronic fusion. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Aneutronic_fusion

[20] *A roadmap to the realisation of fusion energy* [online]. EFDA, 2012 [cit. 2018-05-04]. ISBN 978-3-00-040720-8. Dostupné z: https://www.euro-fusion.org/fileadmin/user_upload/EUROfusion/Documents/Roadmap.pdf

[21] EAST Tokamak achieves stationary H-mode plasmas. In: *Iter* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: https://www.iter.org/newsline/156/511

[22] COMPASS Tokamak. *Institute of plasma physics of the Czech academy of sciences* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: http://www.ipp.cas.cz/vedecka_struktura_ufp/tokamak/tokamak_compass/

[23] T-time for JET. *Iter* [online]. 2014 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: https://www.iter.org/mag/4/34

[24] THE ITER TOKAMAK. *Iter* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: https://www.iter.org/mach

[25] Stellarator. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Stellarator#How_the_plasma_is_heated

[26] Complex Plasma System (High-temperature Plasma Physics). In: *KYOTO UNIVERSITY* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: https://www.s-ee.t.kyoto-u.ac.jp/en/information/laboratory/htpp

[27] TJ-II. In: *FusionWiki* [online]. [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: http://fusionwiki.ciemat.es/wiki/TJ-II

[28] Wendelstein 7-X. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Wendelstein_7-X

[29] Jak uchladit hvězdu v krabici?. *ATOMINFO* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: http://atominfo.cz/2014/06/jak-uchladit-hvezdu-v-krabici/

[30] ITER design time-averaged surface heat flux (MW/m 2) on front surfaces of PFUs Go to publication Download. In: *ResearchGate* [online]. 2015 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/ITER-design-time-averaged-surface-heat-flux-MW-m-2-on-front-surfaces-of-PFUs_fig5_301549885?_sg=IYPsaw6F0JgUPbuZQtNv_Bf-fyS-C2krXxID17_TXU1qVI2jI72y9WtUyXtbDRbfWBrTSDLfnATJPcb9nuw36A

[31] COOLING WATER. *Iter* [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: https://www.iter.org/mach/coolingwater

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	**Veličina**	**Jednotka**
E	Energie	J
m	Hmotnost	kg
c	Rychlost světla	$km.s^{-1}$
εj	Separační energie	J
Ej	Vazebná energie	J
A	Nukleonové číslo	-
T	Teplota	K
n	Součin hustoty	m^{-3}
τ	Doba udržení plazmatu	s
Q	Poměr uvolňovaného výkonu fúzního reaktoru k příkonu zažehnutí a ohřívání plazmatu	-

Zkratka	**Význam**
JE	Jaderná elektrárna

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1.1 Závislost separačních energií na nukleonovém čísle [5]
Obr. 1.2 Porovnání velikosti EBLM JO555-57ab s planetou Saturn [9]
Obr. 2.1 Umělecká představa Kantrowitcova toroidu [11]
Obr. 3.1 Současná energetická situace [1]
Obr. 3.2 Rozložení zdrojů ropy a její spotřebitelé [16]
Obr. 3.3 Účinný průřez jaderných reakcí na výrobu tritia [17]
Obr. 3.4 Účinný průřez zvažovaných fúzních reakcí [17]
Obr. 3.5 Magnetické udržení v tokamacích [19]
Obr. 3.6 Princip inerciálního udržení [1]
Obr. 3.7 Reakce uvažované pro bezneutronovou fúzi [20]
Obr. 3.8 Dlouhodobý plán k zisku elektrické energie za využití fúze [21]
Obr. 3.9 Schéma tepelného zatížení divertoru v $MW.m^{-2}$ [30]
Obr. 3.10 Palivový cyklus I. generace fúzních elektráren [15]
Obr. 3.11 Princip divertoru [2]
Obr. 3.12 Schéma fúzní elektrárny I. generace [4]
Obr. 3.13 Schéma chladicího systému projektu ITER [31]
Obr. 4.1 Metody ohřevu plazmatu v tokamacích [4]
Obr. 4.2 Vakuová komora tokamaku EAST [2]
Obr. 4.3 Kryostat tokamaku EAST [22]
Obr. 4.4 Parametry tokamaku COMPASS [4]
Obr. 4.5 Porovnání tokamaků s geometrickou podobností s tokamakem ITER [23]
Obr. 4.6 Parametry tokamaku JET [4]
Obr. 4.7 Výměna částí divertoru v tokamaku JET [24]
Obr. 4.8 Tokamak ITER [25]
Obr. 5.1 Schéma heliotronu [26]
Obr. 5.2 Schéma heliacu [27]
Obr. 5.3 Schéma heliasu [28]

Tab. 3.1 Světové energetické zdroje ve standardních jednotkách paliva [1]
Tab. 3.2 Světové energetické zdroje v MJ [1]
Tab. 3.3 Vlastnosti materiálů zvažovaných pro divertor [2]