

Netradiční využití jaderné energie

Pavel Zácha

15.11.2022

Netradiční využití jaderné energie

Formy jaderné energie

Štěpná jaderná reakce

- štěpení těžkých jader (U, Pu)
 - ➔ reaktory (elektrárny, teplárny, pohony, odsolování mořské vody, těžba ropy), bomby

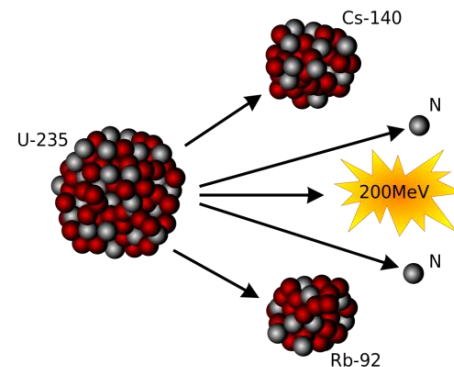
Radioaktivní přeměna

- radioaktivní přeměna (rozpad) nestabilních izotopů
 - ➔ radioizotopové generátory, radioterapie a nukleární medicína, geotermální energie (pasivní využívání)

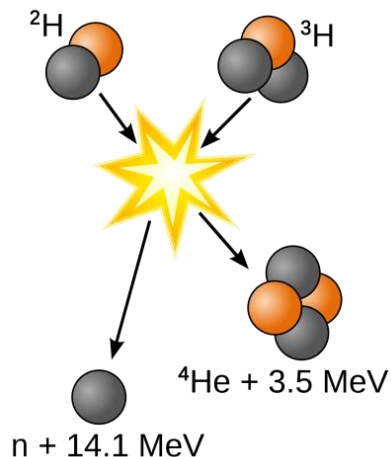
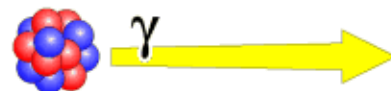
Termojaderná fúze

- slučování velmi lehkých jader (nejčastěji D+T)
 - ➔ tokamak, stelarátor

https://cs.wikipedia.org/wiki/Jaderná_energie



jádro atomu



Netradiční využití jaderné energie

Historie využívání energie ze štěpné jaderné reakce

První...

jaderný reaktor (Chicago Pile) - 1942

reaktor pro výrobu plutonia (X-10) - 1944

jaderná bomba (Trinity test) - 1945

reaktor vyrábějící el. energii (EBR-1) - 1951

jaderná ponorka (Nautilus) - 1954

jaderná elektrárna dvojího využití (AM-1 Obninsk) - 1954

energetický reaktor pro výrobu pouze el. energie (PWR Shippingport) - 1957

jaderná letadlová loď (USS Enterprise) - 1961

-> pohony

-> mírové využití

-> bomby

Štěpná jaderná reakce

Jaderné pohony

Ponorky

Lodě

Letadla

Tanky

Vlaky



Jaderné pohony

Ponorky

USA

1954: 1. jaderná ponorka – **Nautilus**

- 1. plavidlo, jež dokončilo podmořskou plavbu pod Severním pólem (3. 8. 1958)
- poprvé využito **zirkonia** jako povlakového materiálu



SSSR

1957: K-3 Leninskij Komsomol

- 1. sovětská jaderná ponorka



Vzhled surového zirkonia (převzato z Wikipedie)

Jaderné pohony

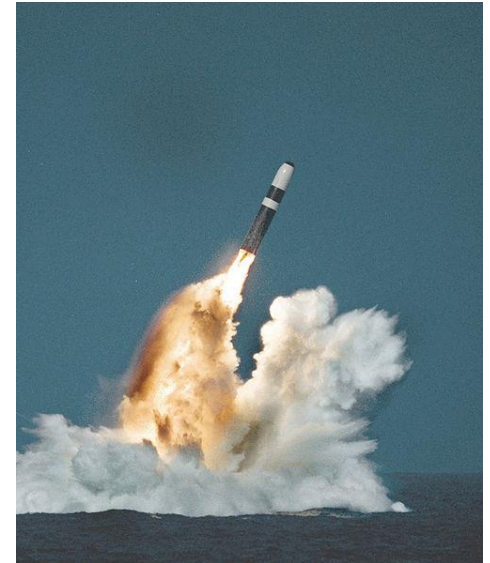
Ponorky

Původní diesel-elektrická konstrukce ponorek

- těžké akumulátory
- dobíjení akumulátoru pístovými spalovacími motory (nutnost vynoření pro přívod vzduchu, později schnorchel)
- malý výkon, malé rychlosti pod hladinou a menší akční rádius (desítky tisíc km)

Výhody jaderného pohonu

- odstranila většinu nevýhod ponorky dieslo-elektrické konstrukce
- **bez nutnosti vynořování** – takřka neomezeně dlouhé setrvání pod hladinou
- **velký výkon** k dosažení vysoké rychlosti pod vodou (max. až 80 km/h)
- vsázka paliva na několik let provozu – obrovský akční rádius (stovky tisíc km)
 - ➡ s výzbrojí balistických raket se ponorky staly hlavním článkem jaderného odstrašování
 - ➡ 1 ponorka dokáže zničit desítky strategických cílů kdekoli na Zemi
 - ➡ **vyklučuje možnost úspěšného preventivního úderu**

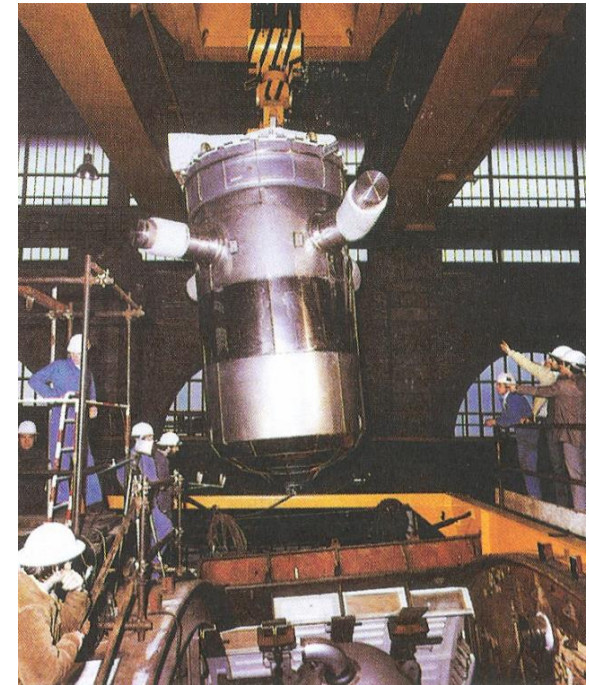


Jaderné pohony

Ponorky

Popis jaderného reaktoru

- tlakovodní reaktory (typ VVER/PWR)
 - oproti grafitovým reaktorům mají malé rozměry a váhu, vysoká mobilita
 - tlak I.O. ~20 MPa, teplota I.O. ~300 °C, II.O. ~250 °C
 - na základě zkušeností z provozu zahájena **výstavba i energetických bloků**
- reaktory chlazené tekutým kovem
 - nosičem je směs Pb-Bi
 - zkušenosti 70 reaktorroků (10 let provozu)
 - výrazně nižší tlak v I.O. (~2 MPa)
 - vyšší kompaktnost
 - vyšší tlak v II.O. zvyšuje bezpečnost
 - nutnost udržovat směs v tekutém stavu
 - vyšší jaderná bezpečnost

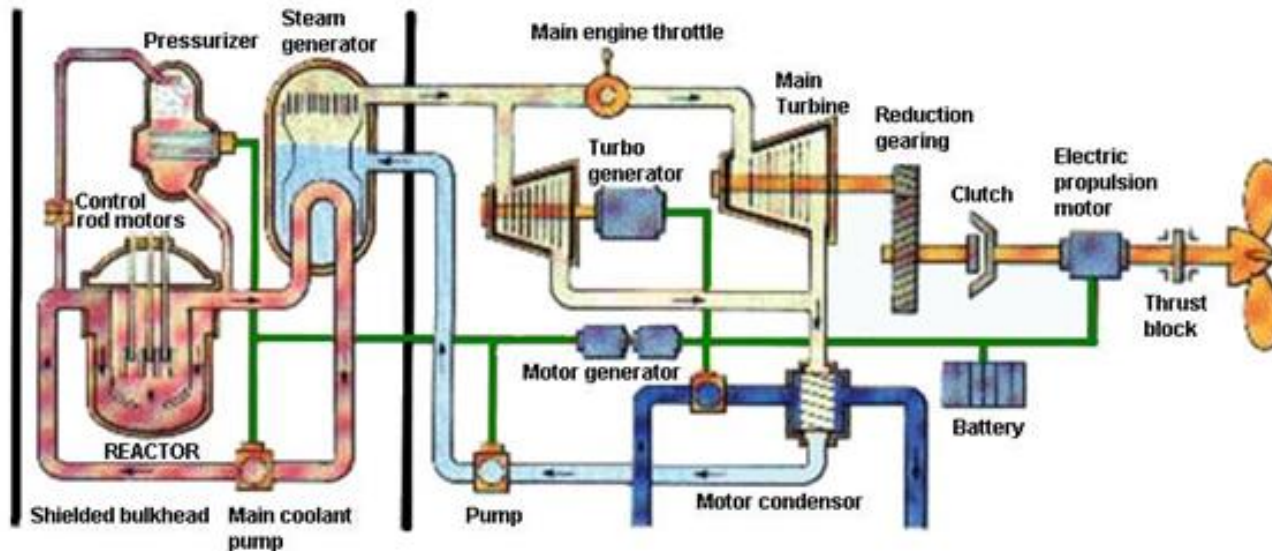


Jaderné pohony

Ponorky

Vývoj jaderných bloků

- shodují se s generacemi ponorek – jejich vývoj šel společně s ponorkami
- s generacemi ponorek se vylepšovaly i jaderné bloky:
 - snižování prostorové a váhové náročnosti (zkracování potrubí, zmenšování komponent)
 - **zvyšování jaderné bezpečnosti**, spolehlivosti zařízení a odolnosti bezpečnostních bariér
 - vylepšování i v reakci na vzniklé havárie spojené s únikem radioaktivity
 - zvyšování výkonu a účinnosti
 - snaha o integrální provedení (nemožnost výměny – nutná vysoká spolehlivost)

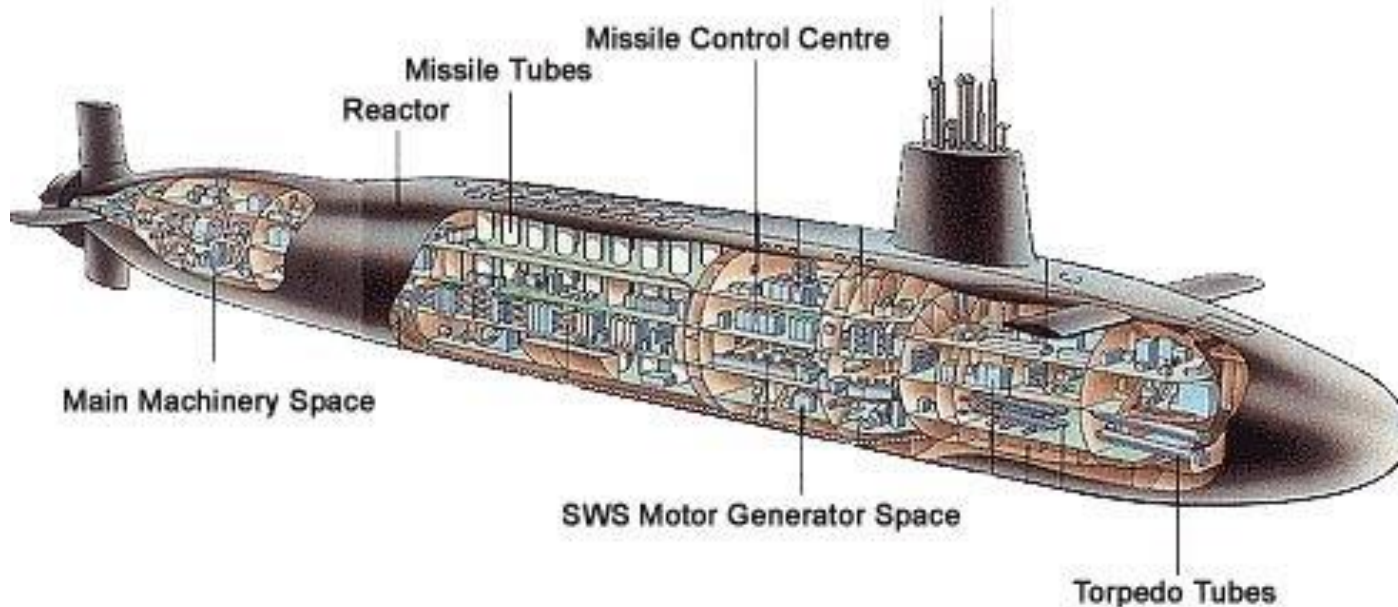


Jaderné pohony

Ponorky

Konstrukce

- dvouplášťové provedení
 - vnější ocelový plášť tvarován pro dosažení vysoké podhladinové rychlosti
 - vnitřní tlakový ocelový trup zajišťuje bezpečný ponor do vysokých hloubek
- dělení ponorky do úseků
 - reaktor v zadní části spolu s hlavní strojovnou

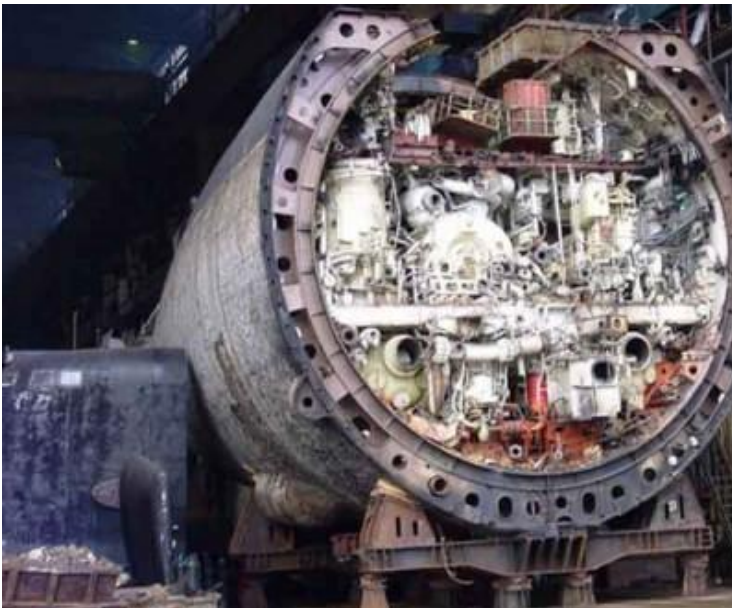


Jaderné pohony

Ponorky

Konstrukce

- dvouplášťové provedení
 - vnější ocelový plášť tvarován pro dosažení vysoké podhladinové rychlosti
 - vnitřní tlakový ocelový trup zajišťuje bezpečný ponor do vysokých hloubek
- dělení ponorky do úseků
 - reaktor v zadní části spolu s hlavní strojovnou



Jaderné pohony

Lodě

Letadlové lodě (USA)

1961-2017: **USS Enterprise (CVN-65)**

- nejstarší letadlová loď s jaderným pohonem
- pohon 8x 170 MW_t, 4x turbosoustrojí, celkem 210 MW_e
- použita při útoku na Viet Cong

2017: **USS Gerald R. Ford (CVN-78)**

- nejnovější letadlová loď s jaderným pohonem, 2x 700 MW_t



USS Enterprise



USS Gerald R. Ford

Jaderné pohony

Lodě

Raketové křižníky (Rusko)

1977: Kirov - první ze čtyř těžkých raketových křižníků

- největší válečné neletadlové lodě světa ve službě
- 2 reaktory, celkem 300 MW_t
- od roku 1999 v aktivní službě pouze nejmodernější z nich (Petr Veliký)



Těžký křižník „Petr Veliký“

Jaderné pohony

Lodě

Ledoborce (Rusko)

1957: **Ledoborec Lenin** - první hladinové a civilní jaderné plavidlo na světě

- pro plavbu v arktických oblastech; 3(2) x 90 MW_t reaktory

1975: **Ledoborec Arktika** – první hladinové jaderné plavidlo na severním pólu (1977)

Třída Arktika: Arktika, Sibir, Rossija, Sovetskij Sojuz, Jamal, 50 Let Pobedy

Třída Tajmyr: Tajmyr, Vajgač



Ledoborec „Lenin“



Třída Arktika

Jaderné pohony

Lodě

Ledoborce (Rusko)

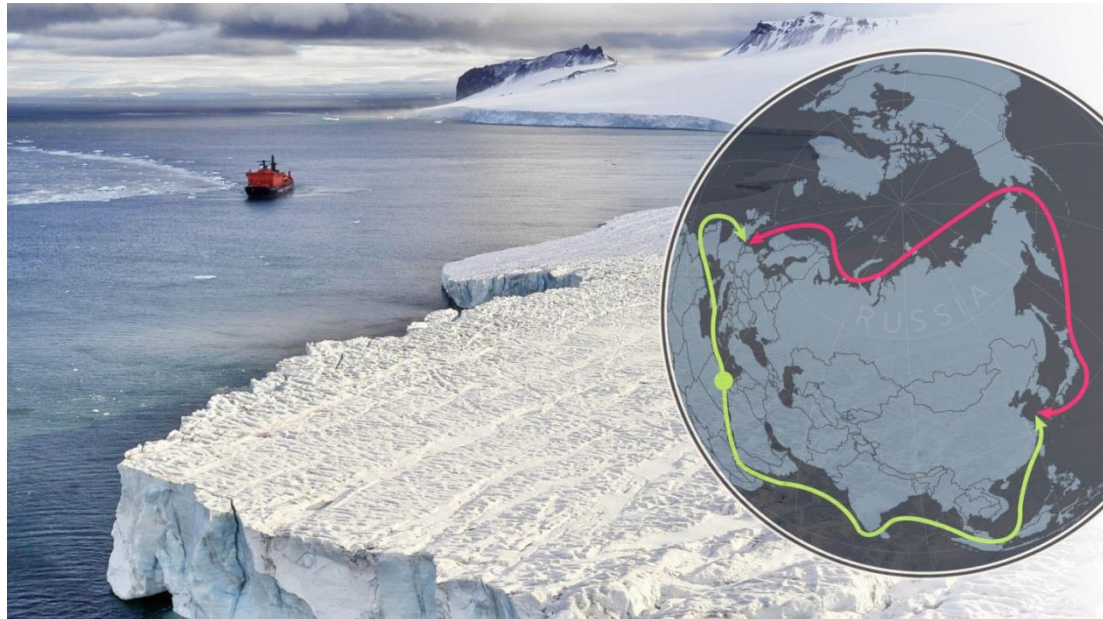
1957: **Ledoborec Lenin** - první hladinové a civilní jaderné plavidlo na světě

- pro plavbu v arktických oblastech; 3(2) x 90 MW_t reaktory

1975: **Ledoborec Arktika** – první hladinové jaderné plavidlo na severním pólu (1977)

Třída Arktika: Arktika, Sibir, Rossija, Sovetskij Sojuz, Jamal, 50 Let Pobedy

Třída Tajmyr: Tajmyr, Vajgač



Severní vs. jižní mořská cesta

Jaderné pohony

Lodě

Nákladní lodě

1959: **NS Savannah** (USA)

- 1 PWR (74 MW_t)
- demonstrace mírového využití jádra (Atoms for Peace)

1964: **Otto Hahn** (Německo), 36 MW_t

1972: **NS Mutsu** (Japonsko), 36 MW_t

Vyšší provozní náklady než u konvenčních lodí

=> neuplatnily se



NS Savannah

Jaderné pohony

Letadla

USA: vývoj od roku 1946 (Projekt NEPA/ANP)

- cíl: vyvinout letadlo s doletem týdnů až měsíců
- vyrobeny 2 (částečně funkční) vzduchově chlazené reaktory (letecké motory)

Convair NB-36H Peacekeeper bomber (1955)

- řada letadel B-36 (Peacemaker)
- reaktor chlazený tekutým sodíkem (1 MW_t)
- 12t olovo-pryžmový štít
- projekt zrušen v r. 1961

Convair NB-36H



Jaderné pohony

Letadla

SSSR: vývoj od roku 1955

Tu119 (TU-95LAL), 1961 - upravený Tupolev Tu-95M

- 40 startů na jaderný pohon
- letadlo mohlo zůstat ve vzduchu přibližně 48 hodin nebo po dobu, kterou byla posádka schopna přežít radiaci vyzařovanou reaktorem

M-60 - nadzvukový letoun

- teoreticky: 2 machy
- operační dolet 25 000 km, dostup 20 km



TU-95LAL

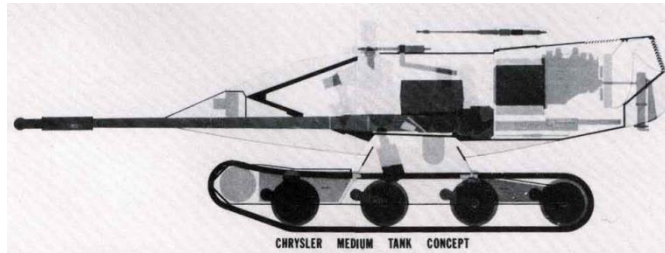
Jaderné pohony

Tanky

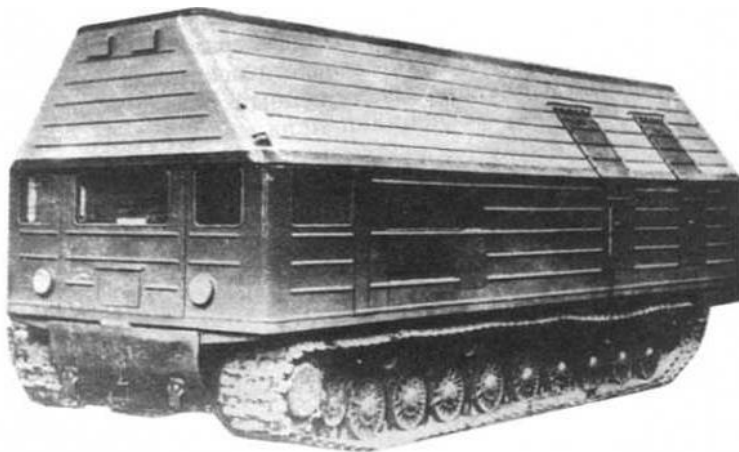
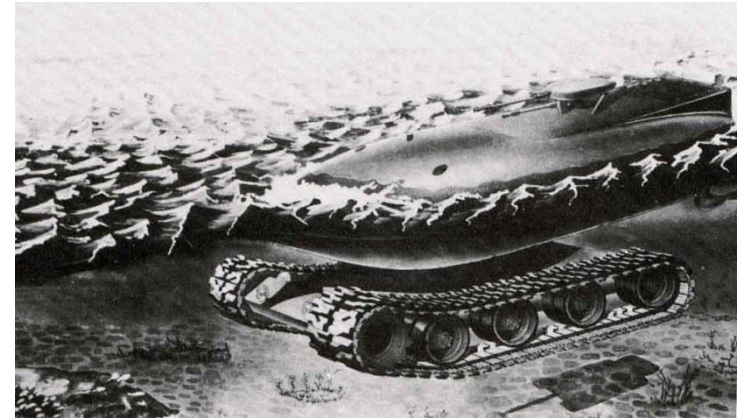
USA: vývoj konceptu od roku 1955

1954 - první působivý model tanku s označením **TV-1**; chlazení vzduchem, dvouokruhový

1955 - koncept tanku **Chrysler TV-8**; PWR



Chrysler TV-8



SSSR: vývoj v 50. letech

- pokus umístit reaktor na podvozky tanků T-10
- pásové vozidlo **TES-3**
- PWR (tlak 13 MPa; 270 °C; AZ 0,6x0,66 m; palivo na 250 dní provozu)
- 1,5 MW_e (8,8 MW_t); 310 t
- malá pojízdná elektrárna (zdroj el. proudu)

TES-3

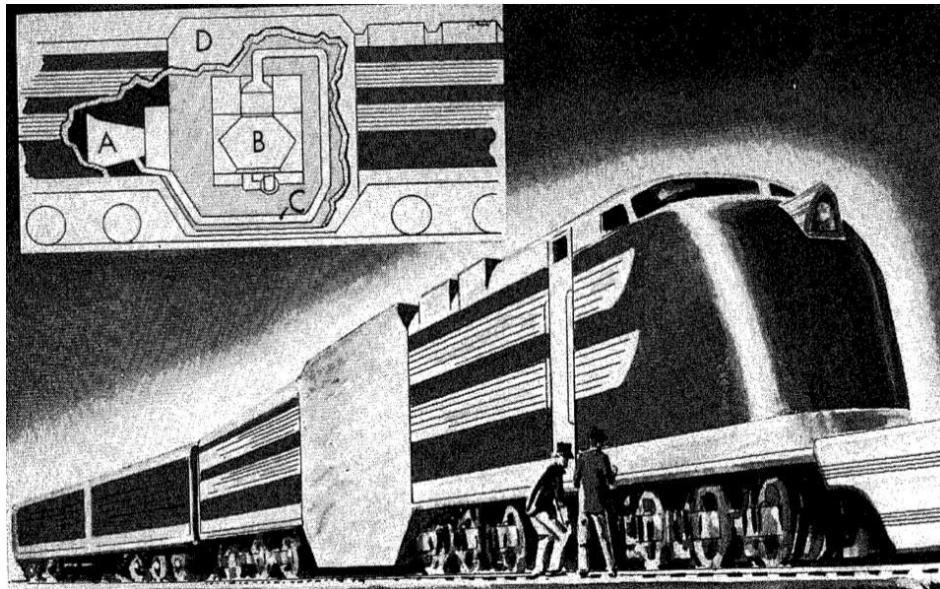
Jaderné pohony

Vlaky

USA: 1954 - Projekt X-12

Lokomotiva na jaderný pohon (pouze koncept)

- nahrazení 4 dieselových lokomotiv
- náplň 14 kg kapalného paliva (30 MW_t)
- 360 t (200 t stínění)
- 38 m motor + 20 m tendr pro chlazení páry z turbíny



Mírové využití

Reaktory z ponorek pro mírovou energetiku

- zkušenosti s provozem na jaderných ponorkách a ledoborcích, celkem **6000 reaktorroků**
- vznik jaderných zdrojů v odlehlých oblastech
- automatický a bezúdržbový systém
- výměna paliva ve speciálním závodě (kampaň 5-6 let)

Odsolování mořské vody

- rychlý jaderný reaktor BN-350 (Kaspické moře)
 - el. výkon 135/350 MW
 - produkce **120.000 t** destilované vody/den
 - v provozu 1973-1999
- *Pozn: pro produkci 1 miliónu m³ pitné vody za den je potřeba zařízení s instalovaným výkonem cca 300 MW_e. Toto množství by mělo pokrýt spotřebu 3 až 4 miliónů lidí.*



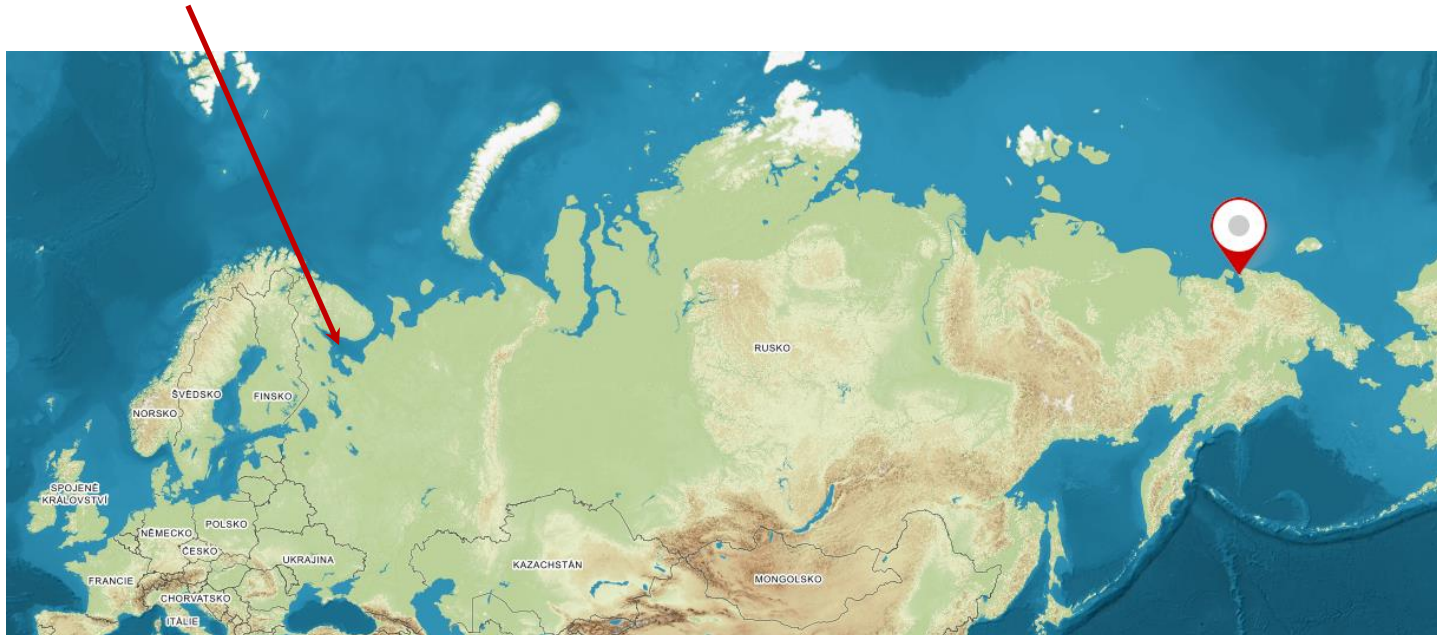
Mírové využití

Plovoucí elektrárny

Elektrárna akademik Lomonosov

Mezi 23.8. a 23.9. 2019 se přepravila mezi Severodvinskem a městem Pevek na ruském poloostrově Čukotka na Dálném Východě.

- jediná plovoucí jaderná elektrárna na světě
- pro zásobování odlehlého místa nepřístupného běžné energetické infrastruktuře
- stavba v Severodvinsku



Mírové využití

Plovoucí elektrárny

Elektrárna akademik Lomonosov

- pro Čukotský region (SV Rusko, těžba minerálů)
- 20 let vývoje
- 144x30 m; 2 reaktory PWR (2x35 MW_e)
- nejseverněji provozovaná elektrárna světa, nahradí starší 2 elektrárny
- alternativní možnost odsolování mořské vody až **240 000 m³/den**



Jaderné zbraně

První jaderná bomba vyvinuta v rámci vojenského projektu Manhattan (Trinity test 16.7.1945)

Výzkum – Los Alamos (R. J. Oppenheimer)

Typy jaderných zbraní

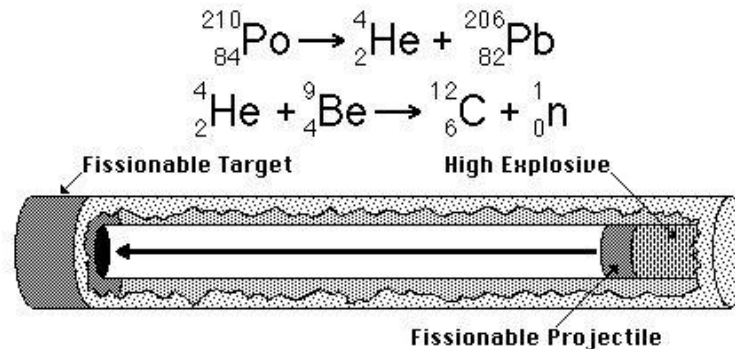
- Čistě štěpné
 - Puškové
 - Implozní
- Fúzně zesílené štěpné
- Dvoustupňové termonukleární
- Vodíkové
- Třístupňové
- Neutronové
- Kobaltové
- Ostatní



Jaderné zbraně

Štěpné bomby

- Vyhnutí se předčasnému výbuchu zbraně musí být jaderný materiál rozdělen do dvou nebo více **podkritických částí** (jednotlivé části neuvolňují při rozpadu dostatečný počet neutronů nutných ke štěpné reakci)
- Mechanismus spojující tyto podkritické části je nejdůležitější část zbraně
 - Podkritické části musí být spojeny **dostatečně rychle** tak, aby se vytvořil kompaktní celek dříve (řádově ms), než se spustí štěpná řetězová reakce a odmrští obě části od sebe (selhání bomby)
- Pro zajištění spuštění štěpné řetězové reakce musí být k dispozici zdroj neutronů
 - Kombinace **Po-210** (emituje alfa částice) a **Be-9** (po srážce s alfa částicemi emituje neutrony)
 - Oba izotopy (Po-210 a Be-9) jsou oděleny fólií blokující alfa částice. Fólie se poruší při spuštění bomby

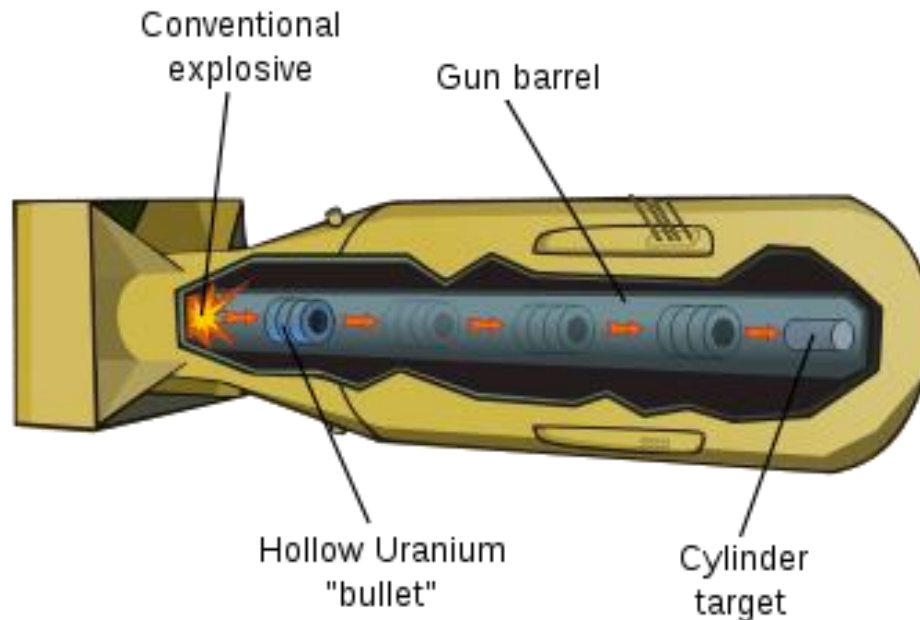


Jaderné zbraně

Štěpné bomby

Little Boy

- Bomba svržená na Hirošimu, 6.8.1945 (netestována)
- 64 kg U, průměrné obohacení 80% (51 kg U-235)
- **dělový typ** - založena čistě na kritickém množství (bez stlačení)
- 1 část podkritického množství je vystřelena z hlavně → dojde ke spojení s druhou částí
- účinnost cca 1 % (13-18 kt TNT)
- neúčinnost způsobena velkou rychlostí expanze štěpícího se materiálu → rychlý pokles hustoty
- výhoda v jednoduchosti a malé velikosti bomby (malý průměr, dělostřelecké pouzdro)

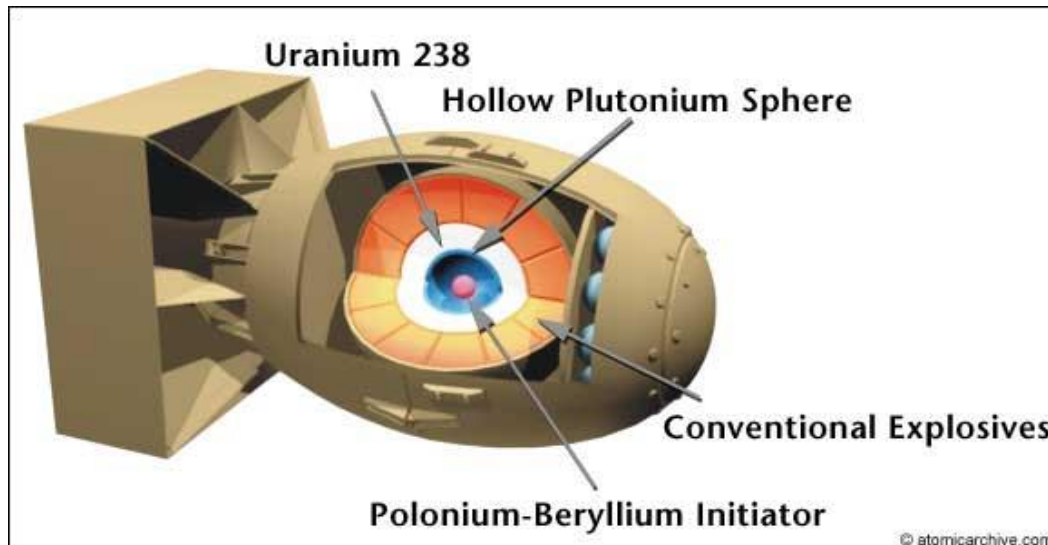


Jaderné zbraně

Štěpné bomby

Fat Man

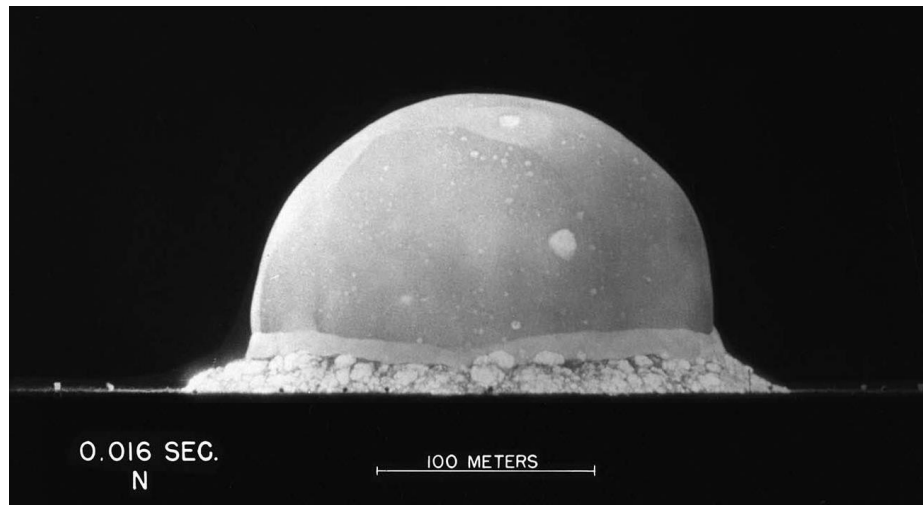
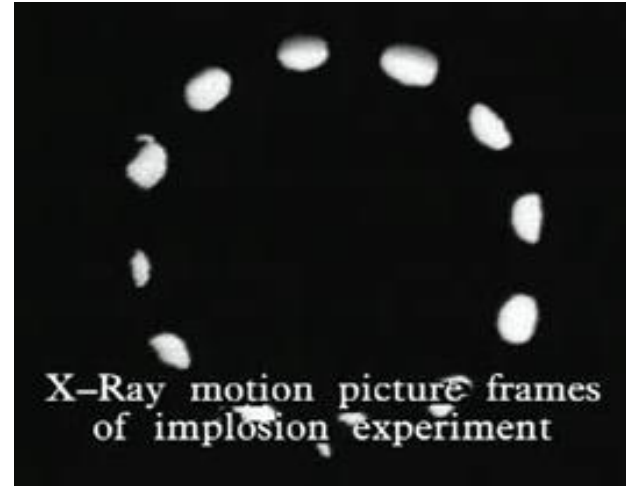
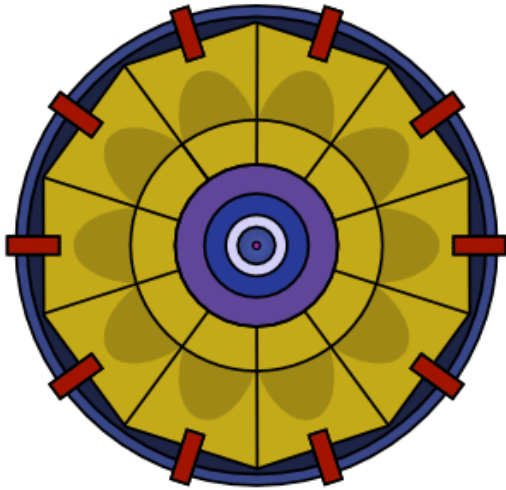
- Bomba svržená na Nagasaki, 9.8.1945 (testována - Trinity test)
- 6,2 kg Pu-239 (350 ml); 39 % kritického množství (koule)
- obklopen U-238 reflektorem (neutronů)
- nadkritické množství Plutonia je dosaženo jeho **stlačením uniformní detonací** konvenční trhaviny (implozí)
- čím delší stlačování, tím větší účinek před zahájením jaderné exploze
- implozní tlaková vlna musí být **velmi symetrická**
- využití 20 % potenciálu nálože (21 kt TNT), zbytek (5 kg) rozptýlen bez štěpného účinku



Jaderné zbraně

Štěpné bomby

Fat Man



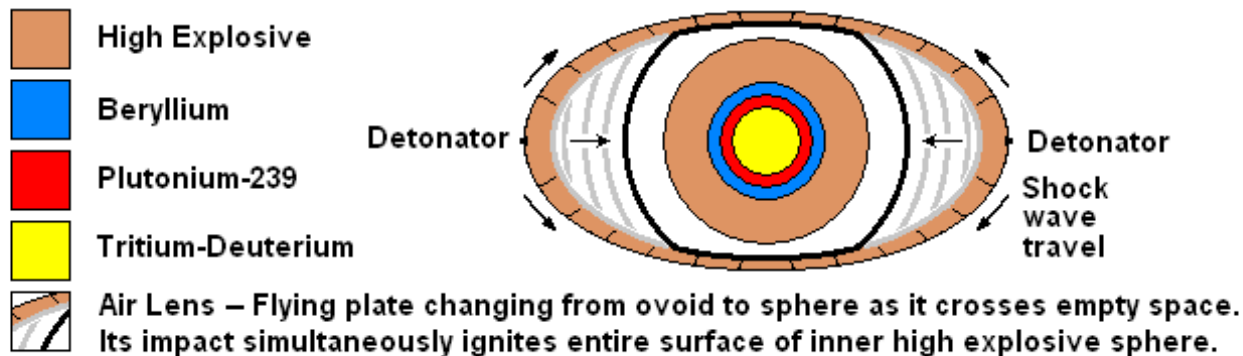
Trinity test

Jaderné zbraně

Fúzně-štěpné bomby

- Zvýšení účinnosti přidáním malého množství tritia do středu bomby
- resp. výrazné snížení velikosti (a hmotnosti) bomby se stejným detonačním účinkem
- těžký reflektor U-238 nahrazen lehkou **skořepinou z Berylia** (také účinně odráží unikající neutrony zpět do středu) → redukce průměru
- zmenšení průměru reflektoru + štěpné části bomby → zmenšení velikosti konvenční exploze → další **redukce průměru**
- Použití již novějšího způsobu imploze (dvoubodová imploze v dutině)

U.S. Swan Device – 1956



Jaderné zbraně

Fúzně-štěpné bomby

- Zvýšení účinnosti přidáním malého množství tritia do středu bomby
- resp. výrazné snížení velikosti (a hmotnosti) bomby se stejným detonačním účinkem
- těžký reflektor U-238 nahrazen lehkou **skořepinou z Berylia** (také účinně odráží unikající neutrony zpět do středu) → redukce průměru
- zmenšení průměru reflektoru + štěpné části bomby → zmenšení velikosti konvenční exploze → další **redukce průměru**
- Použití již novějšího způsobu imploze (dvoubodová imploze v dutině)



Jaderné zbraně

Další bomby

Termonukleární bomba

- větší podíl termonukleární fúze (D+T, D+Li)
- nutné zahřát jádro bomby řádově na miliony stupňů Kelvina

Třístupňové (štěpné – fúzní – štěpné)

- navíc plášť z U-238 – rychlé neutrony vzniklé při fúzní reakci štěpí U-238 → další zesilující účinek zbraně

Kobaltová bomba

- obal bomby obsahuje kobalt, který se působením neutronů změní na radioaktiví kobalt Co-60 s poločasem přeměny 5,24 roku (dlouhodobé zamoření území)

Neutronová bomba

- snížení destruktivního účinku fúzní bomby, posílení účinku záření (zejména neutronů) – poškození obalů buněk → jistá smrt osob v dosahu bomby (do několika dnů/týdnů)
- cílem je zabíjení osob (např. vojáků v pancéřovaných vozidlech), šetrná k destrukci infrastruktury



Jaderné zbraně

Největší odpálená jaderná bomba – Car (57 Mt TNT), 30.10.1961

- ohnivá koule 8 km, hřib 64 km vysoký, průměr hříbu 95 km, seismická vlna měřitelná i po 3 obězích Zeměkoule



Formy uvolněné energie při výbuchu:

- tlaková vlna — 40-60 % celkové uvolněné energie
- tepelné záření — 30-50 % celkové uvolněné energie
- ionizující záření — 5 % celkové uvolněné energie
- radioaktivní látky — 5-10 % celkové uvolněné energie (uvolnění postupně)
- elektromagnetický impuls

Radioaktivní přeměna

Radioizotopový termoelektrický generátor (RTG)

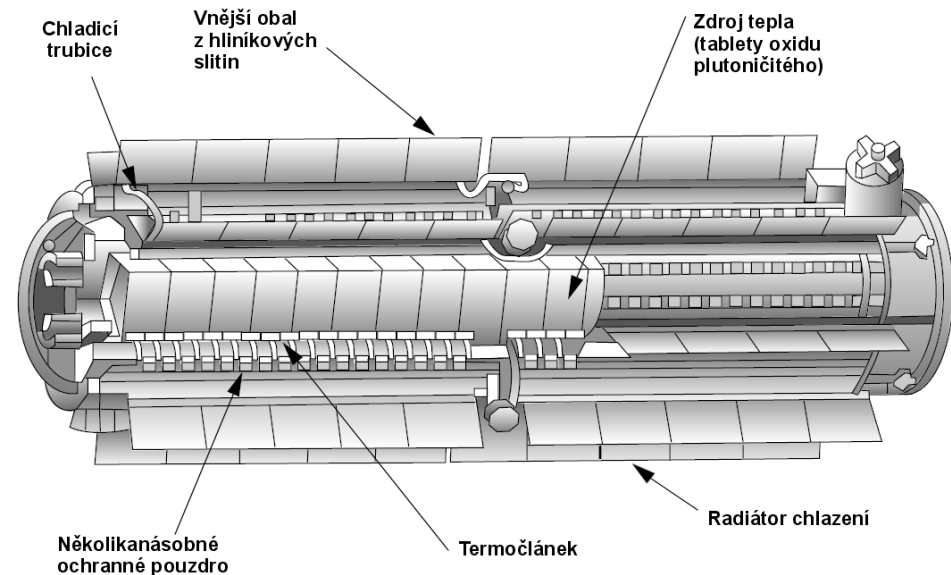
Dlouhodobý a spolehlivý zdroj stejnosměrného elektrického proudu, využívající k získání tepelné energie přeměny radioaktivních izotopů (polovodičové články)

Nejčastější zdroj tepelné energie: izotop Pu-238 (poločas přeměny 87,7 roku; alfa záření)

- alfa částice zachycena na kovovém obalu → tepelná energie
 - nemá vliv na polovodičové termočlánky
 - není nebezpečný pro obsluhu

Použití:

- odlehlé oblasti bez el. energie (meteorologie, oceánografie)
- kosmické aplikace
 - navigační družice
 - vědecké stanice (Měsíc, Mars)
 - sondy Pioneer, Voyager, Cassini...



Radioaktivní přeměna

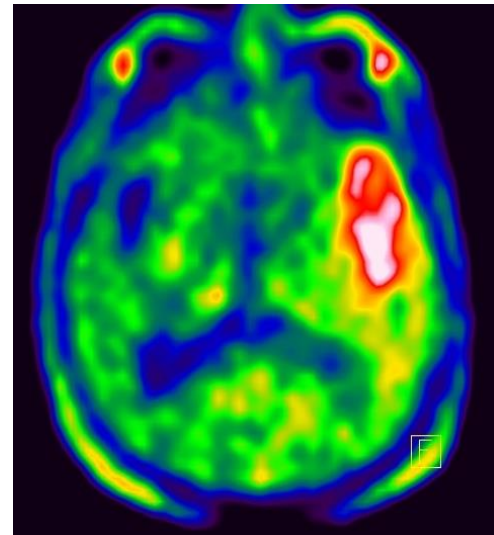
Nukleární medicína (radiofarmaka)

Lékařský obor používající k **diagnostice** a **terapii** chorob zavedení radioaktivních látek (radiofarmak) do těla nemocného.

Izotop vyráběn v **cyklotronu**. Hlavním zobrazovacím přístrojem fyziologických funkcí je tzv. **gama kamera**. Ta zjistí radiaci vyzařovanou indikátorem zavedeným do těla a zobrazení na snímku.

Příklady využití:

- měření vylučovací funkce ledvin
- schopnost koncentrace jódu na štítné žláze (již od r. 1946)
- proudění krve do srdce
- hodnocení plic, jater, žlučníku, kostry atd.



Vizualizace nádoru na mozku

Radioaktivní přeměna

Nukleární medicína (radiofarmaka)

Dvojí využití:

Terapeutická radiofarmaka

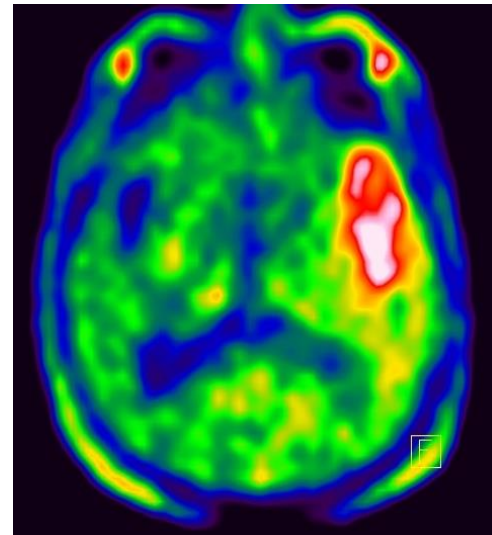
Nosná sloučenina zajišťuje **transport radionuklidu na žádané místo**. Používány pro ničení rakovinné tkáně, či pro paliativní účely (zmírnění bolesti zejména pro pacienty s kostními metastázami)

Diagnostická radiofarmaka

In vivo neinvazivní monitorování biologických jevů, dějů či vlastností pomocí radiově značených radiofarmak s odpovídajícími vlastnostmi. Využívána pro scintigrafické a tomografické aplikace.

Nejčastěji používanými radioizotopy:

- technecium-99m
- jod-123
- jod-131
- thallium-201



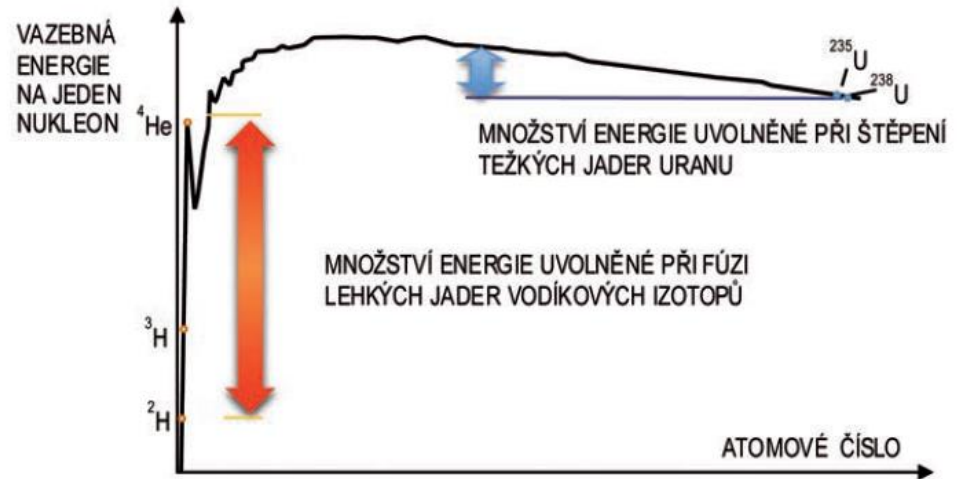
Vizualizace nádoru na mozku

Jaderná fúze

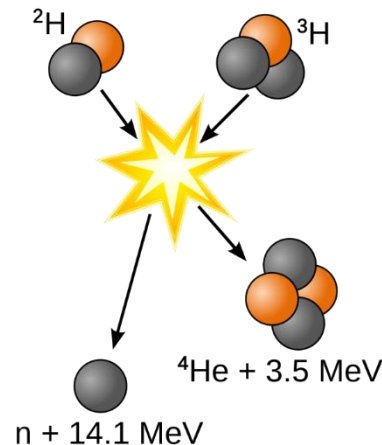
Slučování lehkých atomových jader ($Z \leq 28$)

Historie

- 1905 Einstein Teorie relativity
- 1920 Edington Fúze ve hvězdách
- 1929 Atkinson Fúzní energie hvězd
- 1934 Rutheford Fúze na urychlovači
- 1951 Sacharov, Spitzer - magnetické nádoby
- 1952 Teller Vodíková bomba
- 1957 Lawsonovo kritérium



Uvolněná vazebná energie atomových jader



Jaderná fúze

Možné řešení energetického problému

Rychlý neutron - **14 MeV** (energie využitelná pro výrobu elektřiny)

Exotermní reakce – produkty reakce mají 1000x větší kinetickou energii než vstupní palivo

Možné kombinace paliva

Deuterium-Tritium

- potřebná teplota je relativně nízká (0,1 miliardy stupňů, proto nejpravděpodobnější kombinace)

Deuterium-Helium 3

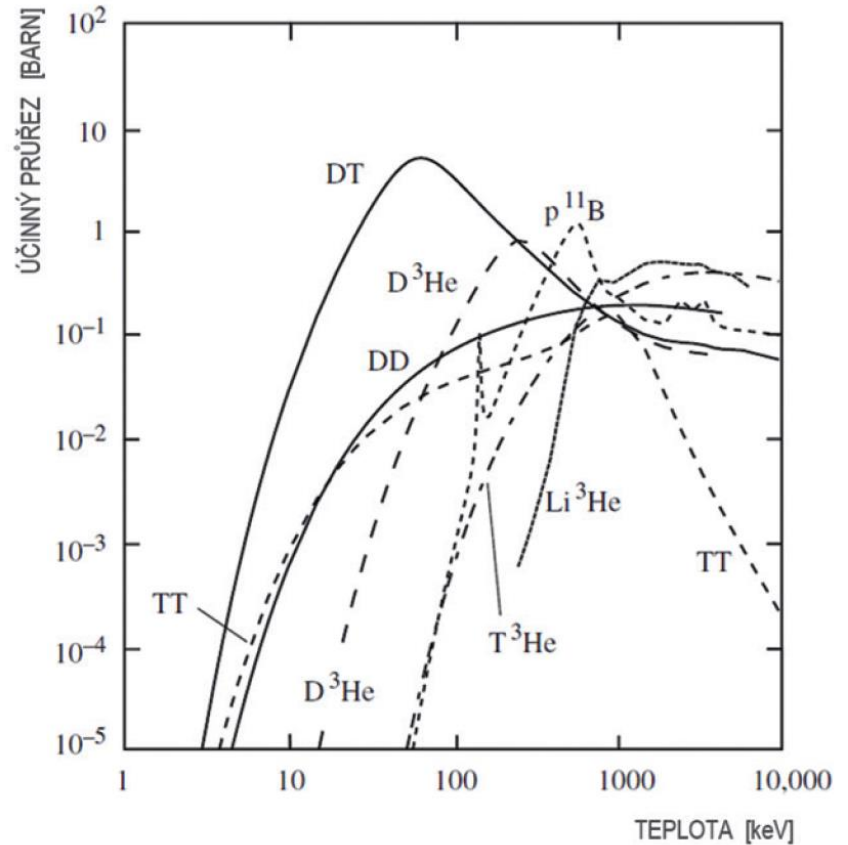
- palivo není radioaktivní, ale He-3 je pouze na Měsíci

Deuterium-Deuterium

- vyžaduje vysoké teploty 1 – 10 miliard stupňů!!

Proton-Proton

- probíhá na Slunci



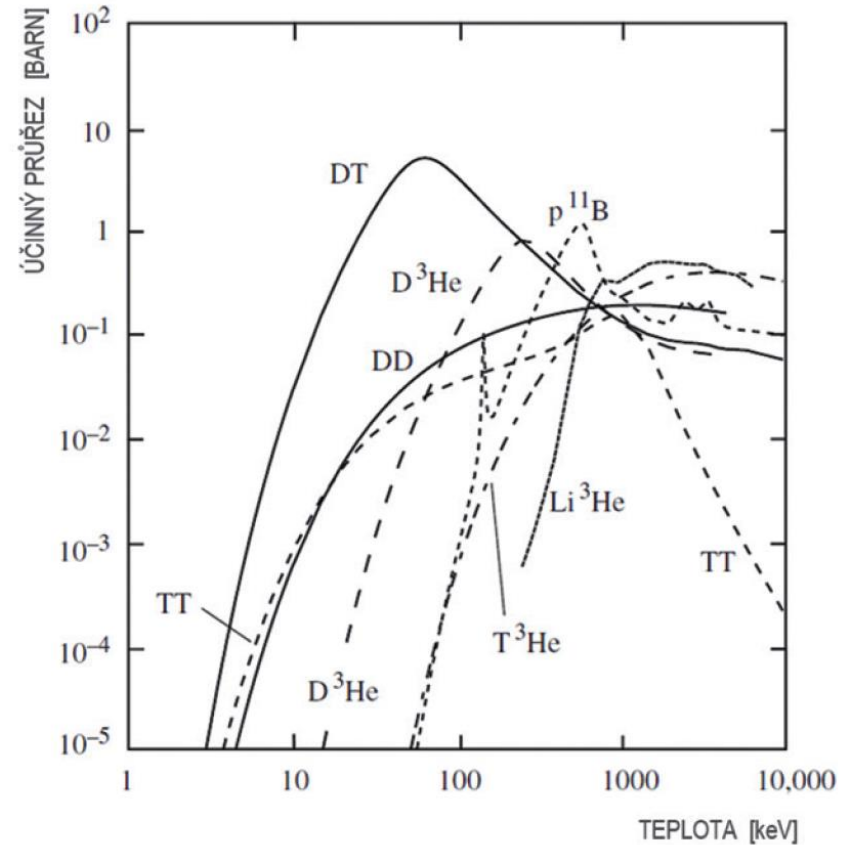
*Účinný průřez různých fúzních reakcí
1 keV = 11,6 MK*

Jaderná fúze

Základní předpoklad pro slučování jader deuteria a tritia:

- Rychlost jader musí být větší než **20 tisíc km/s**. Za normální (pokožové) teploty se jádra (atomy) pohybují pouze rychlostí 1 km/s
- ➔ Abychom jádra paliva urychlili na požadovanou rychlost, je třeba ohřát směs deuteria a tritia na teplotu 200 milionů stupňů Kelvina

Při tak vysokých teplotách je palivo ve stavu, který se nazývá **plazma**



*Účinný průřez různých fúzních reakcí
1 keV = 11,6 MK*

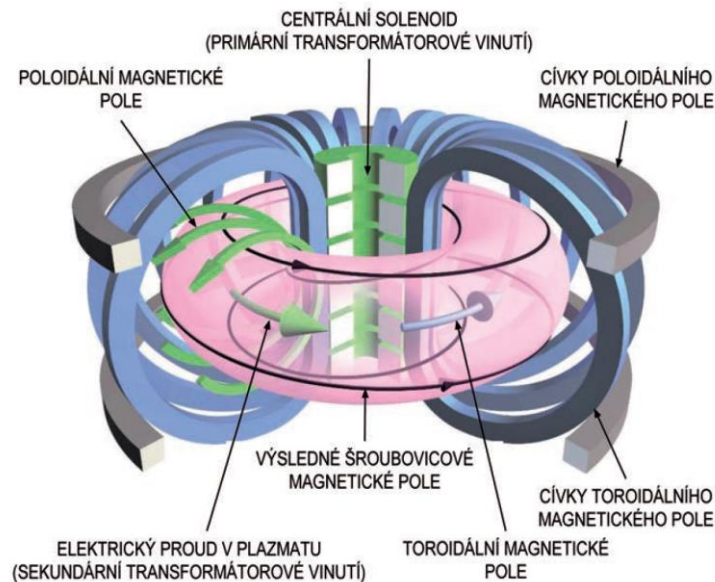
Jaderná fúze

Termojaderná elektrárna na bázi magnetického udržení (tokamak)

Koncept charakteristický indukčně buzeným elektrickým proudem v plazmatu, který se podílí na vytváření **magnetického pole reaktoru**.

Hlavní součástí tokamaku je prstencová (toroidální) **vakuová nádoba**, umístěná na transformátorovém jádru.

Současné tokamaky používají vzduchové transformátory s centrálním solenoidem jako primárním vinutím.



Zjednodušené schéma reaktoru typu tokamak

Jaderná fúze

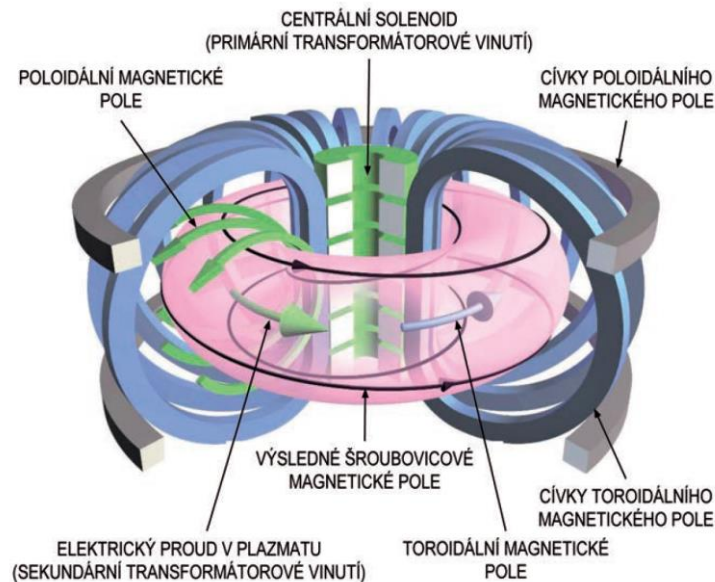
Termojaderná elektrárna na bázi magnetického udržení (tokamak)

Transformátor indukuje v plazmatu v nádobě vysoký elektrický proud, který generuje **poloidální magnetické pole**.

Okolo vakuové nádoby jsou navinuty magnetické cívky, které vytvářejí **toroidální magnetické pole**.

Součtem obou polí vzniká **šroubovicové** (helikální) **magnetické pole**, které brání kontaktu plazmatu s konstrukcí reaktoru.

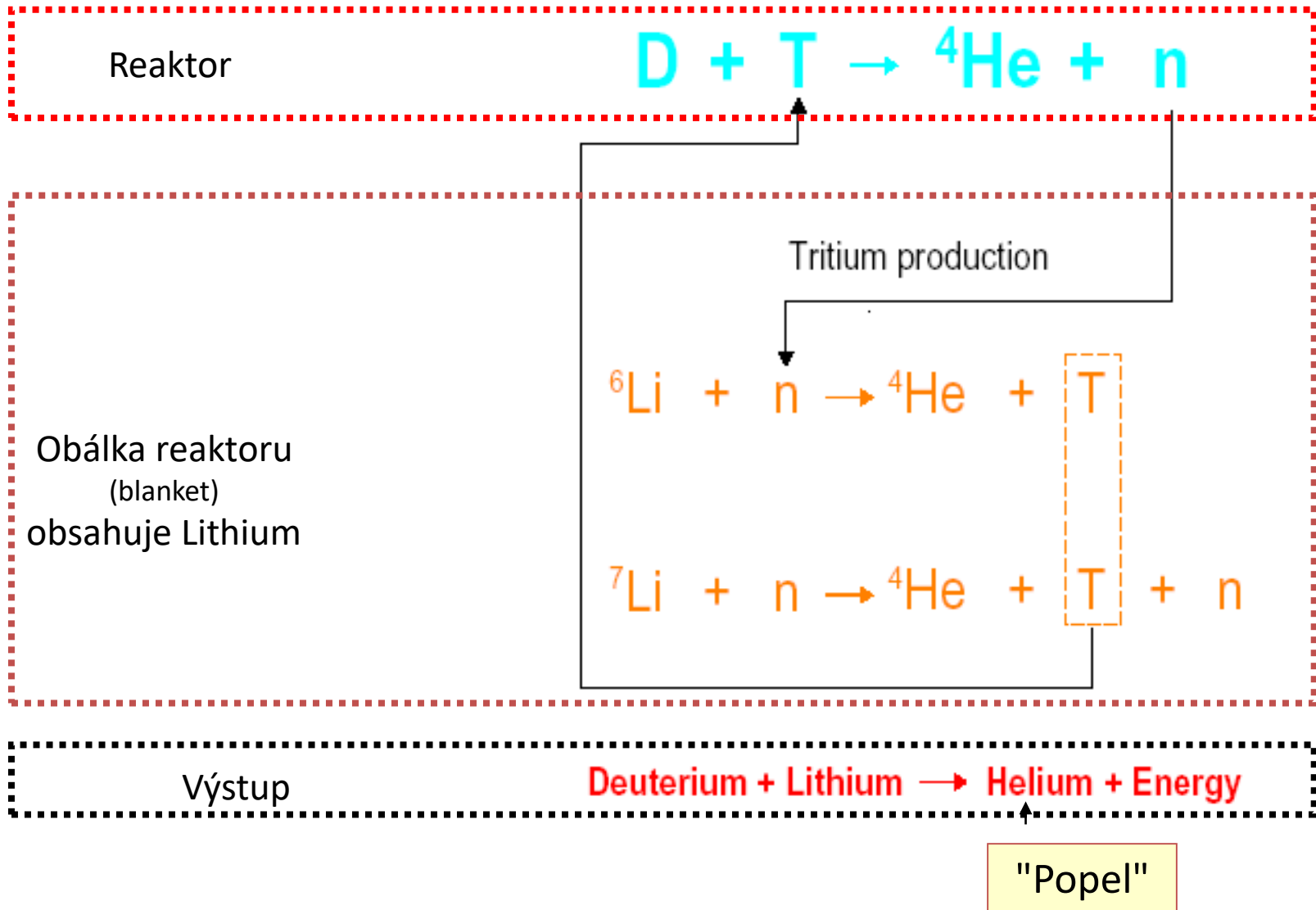
Průchodem indukovaného proudu plazmatem se uvolňuje Jouleovo teplo, které plazma **ohřívá**.



Zjednodušené schéma raktoru typu tokamak

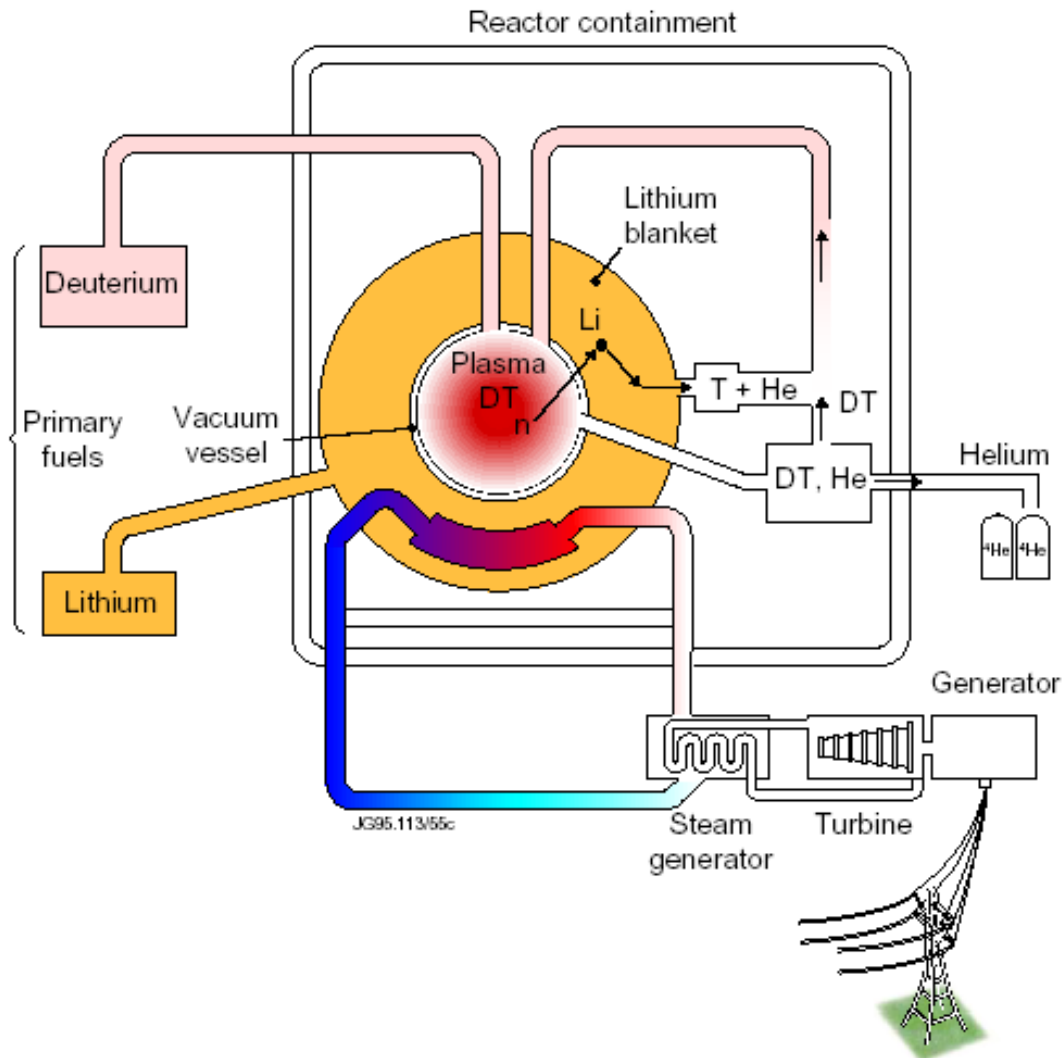
Jaderná fúze

Palivový cyklus fúzního reaktoru



Jaderná fúze

Termojaderná elektrárna na bázi magnetického udržení (tokamak)



Děkuji za pozornost

THINKING GREEN

RECYCLING STAR DUST



Reference

Vybrané (a ústavem editované/redigované) články na wikipedii: Jaderná energie, Jaderná energetika, Jaderná elektrárna Shippingport, Jaderný pohon, Jaderný pohon v kosmu, Jaderné letadlo, Jaderný ledoborec, Akademik Lomonosov, Radiofarmaka, Lawsonovo kritérium.

Lobner, P. Marine Nuclear Power: 1939–2018, Part 2B: United States - Surface Ships. July 2018. Online: https://lynceans.org/wp-content/uploads/2018/07/Marine-Nuclear-Power-1939-2018_Part-2B_USA_surface-ships.pdf

Ramsey, S. Tools of War: History of Weapons in Modern Times. Alpha Editions, 2016. ISBN 978-9386101686.
Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator (MMRTG). National Aeronautics and Space Administration. NF-2020-05-619-HQ. Online: https://mars.nasa.gov/internal_resources/788/

ENTLER, S. et al. Budoucnost energetiky: jaderná fúze. Praha: Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., 2019. Strategie AV21. ISBN 978-80-200-3007-8.