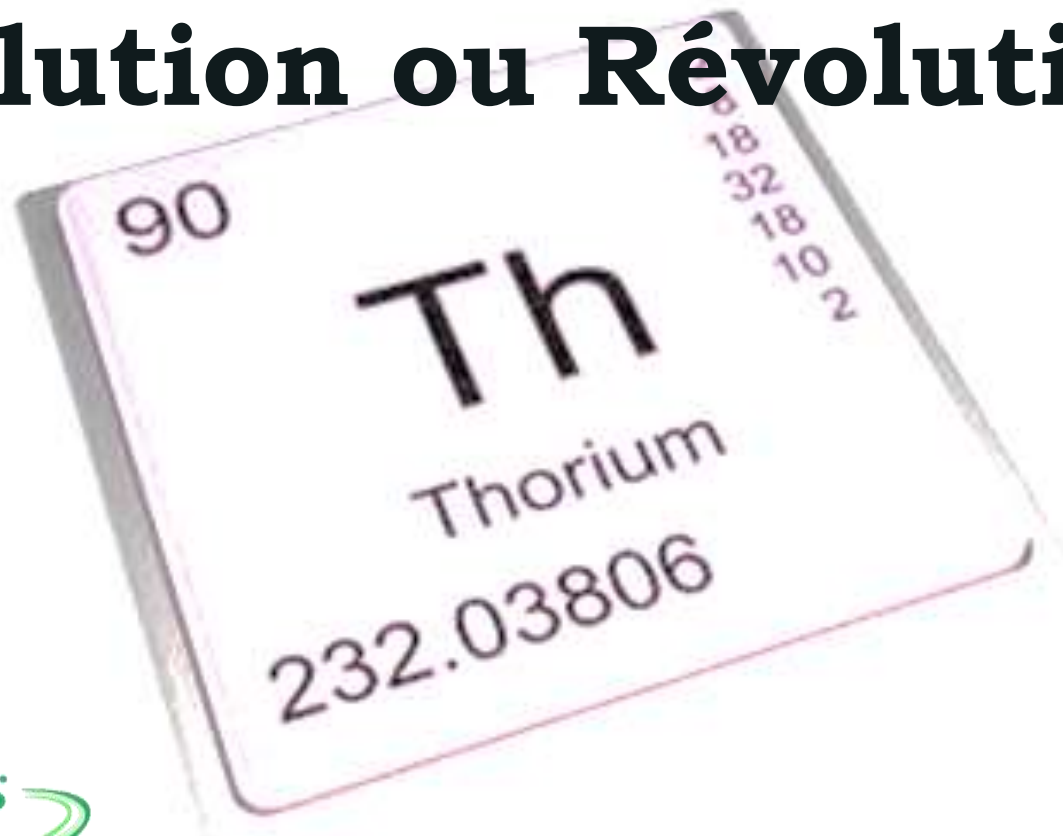


Energie nucléaire et Thorium: Evolution ou Révolution ?

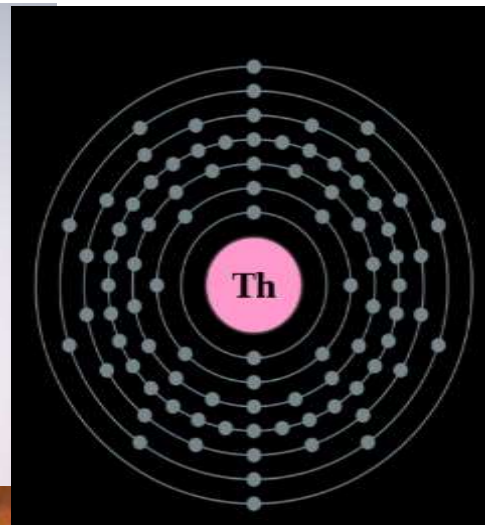
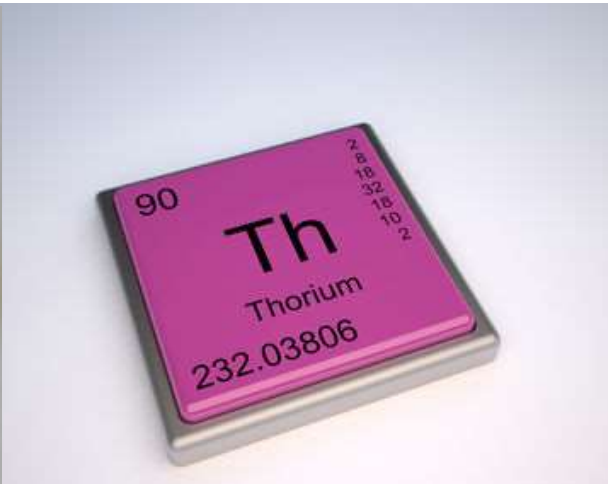


-
- ▶ **Le thorium**
 - ▶ **Historique**
 - ▶ **Cycle du thorium**
 - ▶ **Les types de réacteurs**
 - ▶ **Les déchets / retraitement**
 - ▶ **Prolifération**
 - ▶ **Destruction des déchets**
 - ▶ **Perspectives**
-



-
- ▶ **Le thorium**
 - ▶ Historique
 - ▶ Cycle du thorium
 - ▶ Les types de réacteurs
 - ▶ Les déchets / retraitement
 - ▶ Prolifération
 - ▶ Destruction des déchets
 - ▶ Perspectives





Estimation des réserves de thorium

WORLD THORIUM DEPOSITS

Thorium oxides, silicates and phosphates are found worldwide, often alongside rare-earth elements. Thorium is not yet mined commercially, and abundances are only approximately known in most countries. Numbers show upper estimates of identified thorium reserves (in thousand tonnes).



Différentes sources de thorium

- ▶ Les dépôts de sable noir de monazite contiennent 2 à 22 % de thorium. Il peut être extrait du granit, roches de phosphates, du minerai d'étain, terres rares, charbon et uranium
- ▶ Il a été suggéré que le thorium pourrait être extrait des cendres des centrales à charbon
- ▶ Le sol contient en moyenne 6 ppm de thorium



Comparaison des alternatives

Pour une production annuelle continue de 1 GWe, il faut:



3,500,000 tonnes de
charbon

Impact sur
l'environnement
significatif

En particulier, les
émissions de CO₂



200 tonnes d'uranium

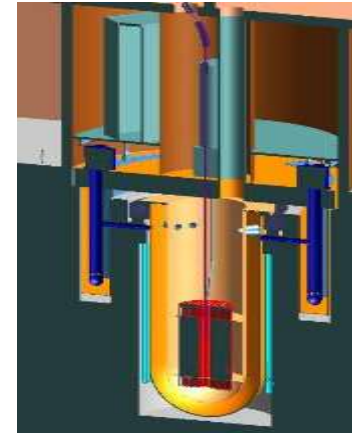
Faible impact CO₂

Mais défis de
retraitement

Stockage de déchets
dangereux à très long
terme

Risque de
prolifération

Enrichissement



1 tonne de thorium

Faible impact CO₂

Peut éliminer le Pu et les
déchets radioactifs

Déchets dangereux en
quantité réduite et de durée
beaucoup plus courte

Pas d'enrichissement

Risque de prolifération
inférieur

-
- ▶ Le thorium
 - ▶ **Historique**
 - ▶ Cycle du thorium
 - ▶ Les types de réacteurs
 - ▶ Les déchets / retraitement
 - ▶ Prolifération
 - ▶ Destruction des déchets
 - ▶ Perspectives





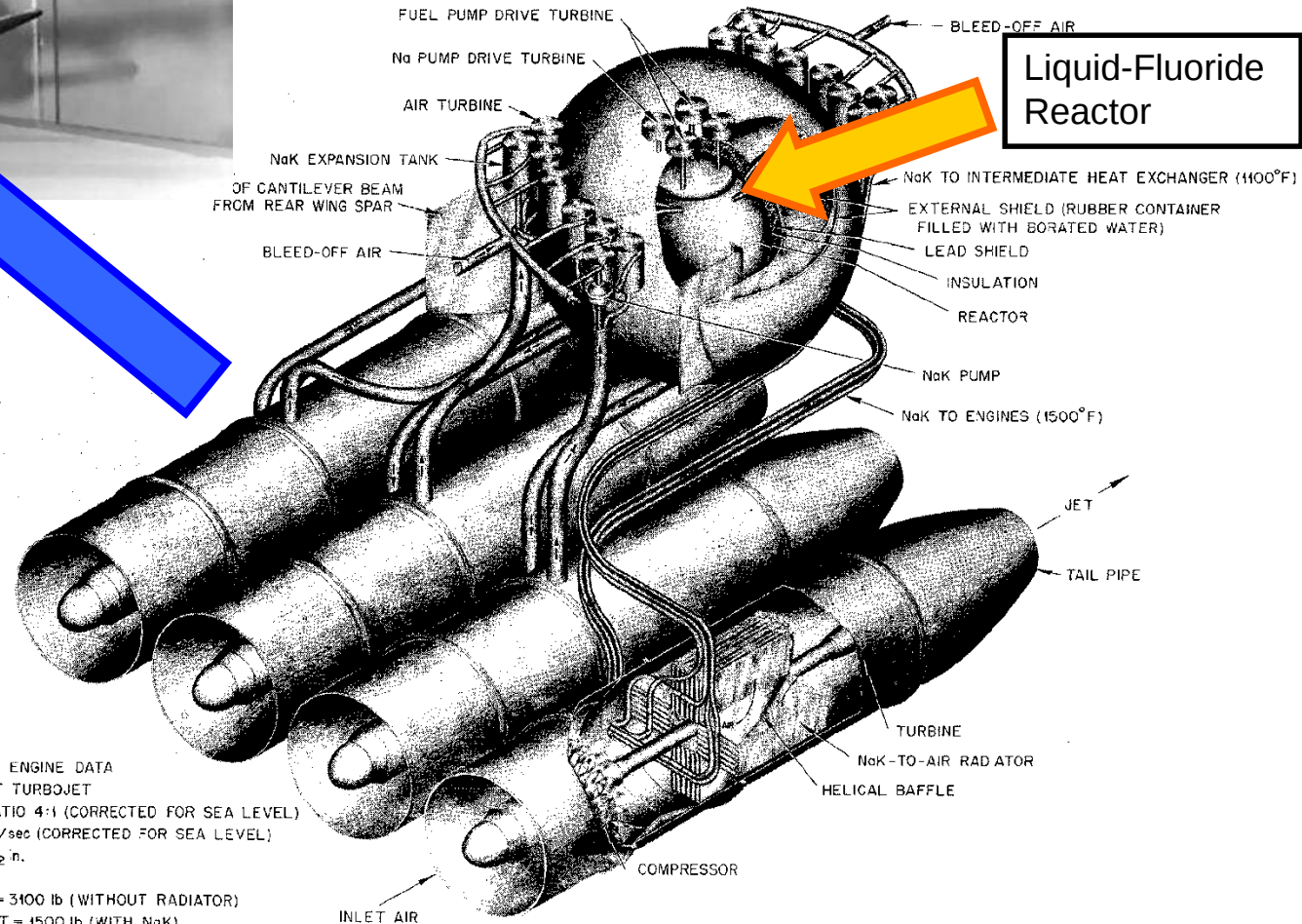
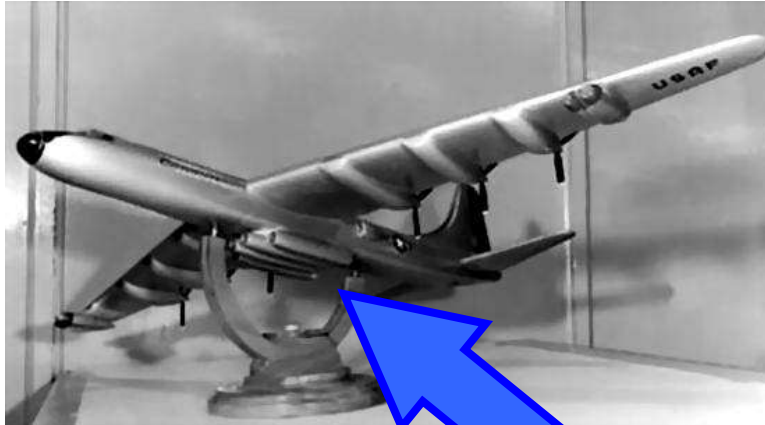
Alvin Weinberg

Director of
Oak Ridge
National
Laboratory



► Convair B-36 X-6

- quatre turbojets alimentés par un réacteur nucléaire
- Réacteur thermique de 200 MW



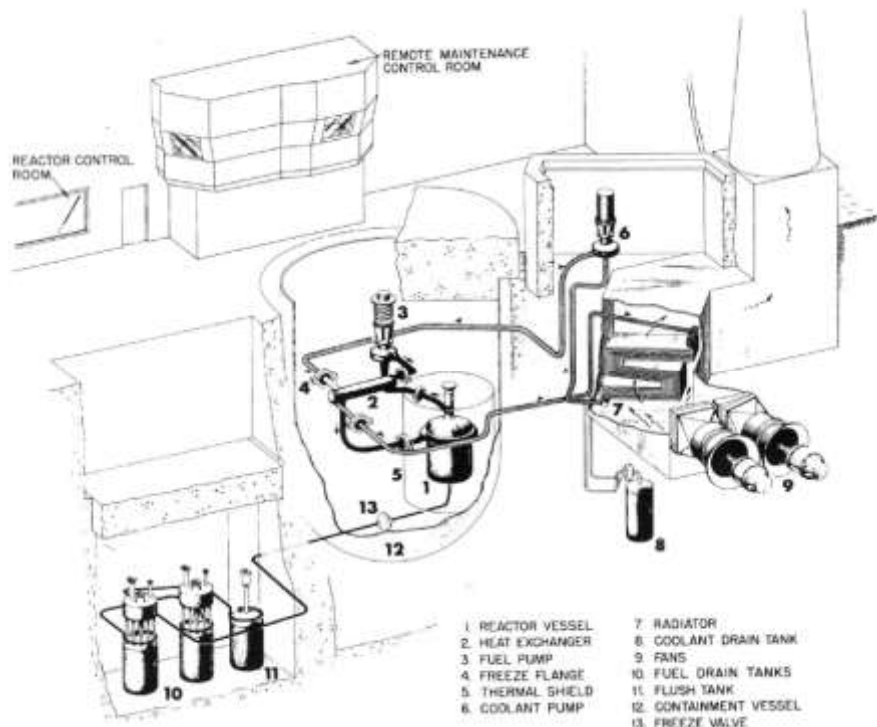


Tupolev Tu-95LAL 1961 Soviet Molten Salt Reactor Powered Bomber

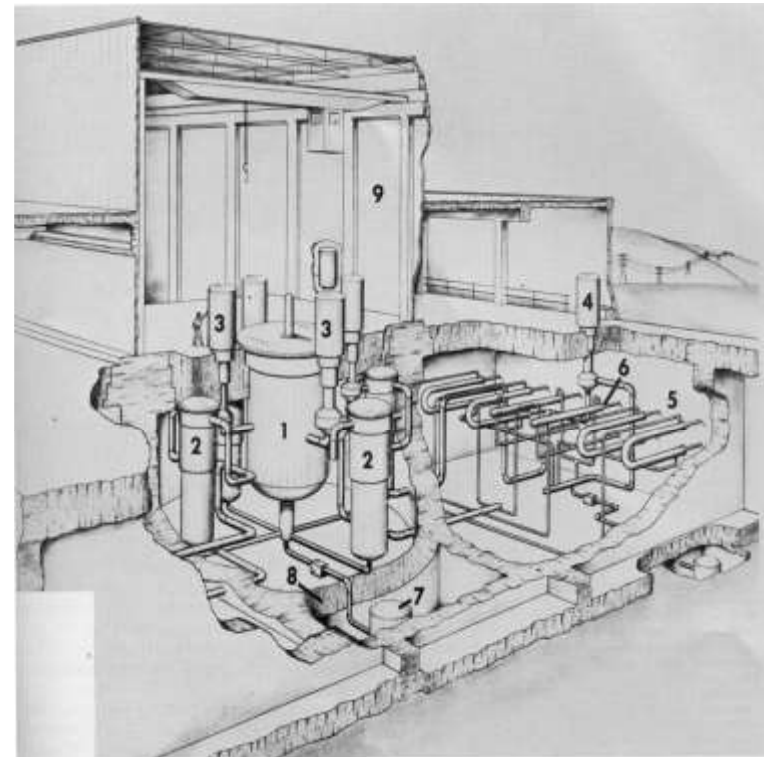


Le programme MSR à Oak Ridge

MSRE (MOLTEN
SALT REACTOR
EXPERIMENT)



Le Projet "MSBR"
2250 MWth - 1000 MWe



Cutaway perspective of MSBR reactor and steam cells. (1) Reactor, (2) Primary heat exchangers, (3) Fuel-salt pumps, (4) Coolant-salt pumps, (5) Steam generators, (6) Steam reheaters, (7) Fuel-salt drain tank, (8) Containment structure, (9) Confinement building.

Projet arrêté en 1976

Réacteurs alimentés au thorium

Table 1. Reactors operated with substantial amounts of thorium

Reactor	Type	Location	Operating period(with thorium)	Thermal power (MWt)	Electric power (MWe)
Elk River	BWR	USA	1962-1968[9]	58	15*
Indian Point	PWR	USA	1962-1964[9]	615	151
Peach Bottom 1	HTGR-prismatic	USA	1966-1972[8]	115	40
Shippingport	LWBR**	USA	1977-1982[8]	236	60
Fort St Vrain	HTGR-prismatic	USA	1974-1989[9]	842	330
AVR	HTGR-pebble	Germany	1967-1988[8]	45	15
THTR	HTGR-pebble	Germany	1985-1989[8]	750	300
Various	PHWR	India	Ongoing	–	–
Dragon	AGR	England	1966-1973	20	
FBTR	LMFBR	India	Ongoing	40	

* plus additional from fossil-fired super heaters.

** Data represent LWBR core, not original Shippingport core, which did not use thorium or ²³³U

Projets Thorium en Europe

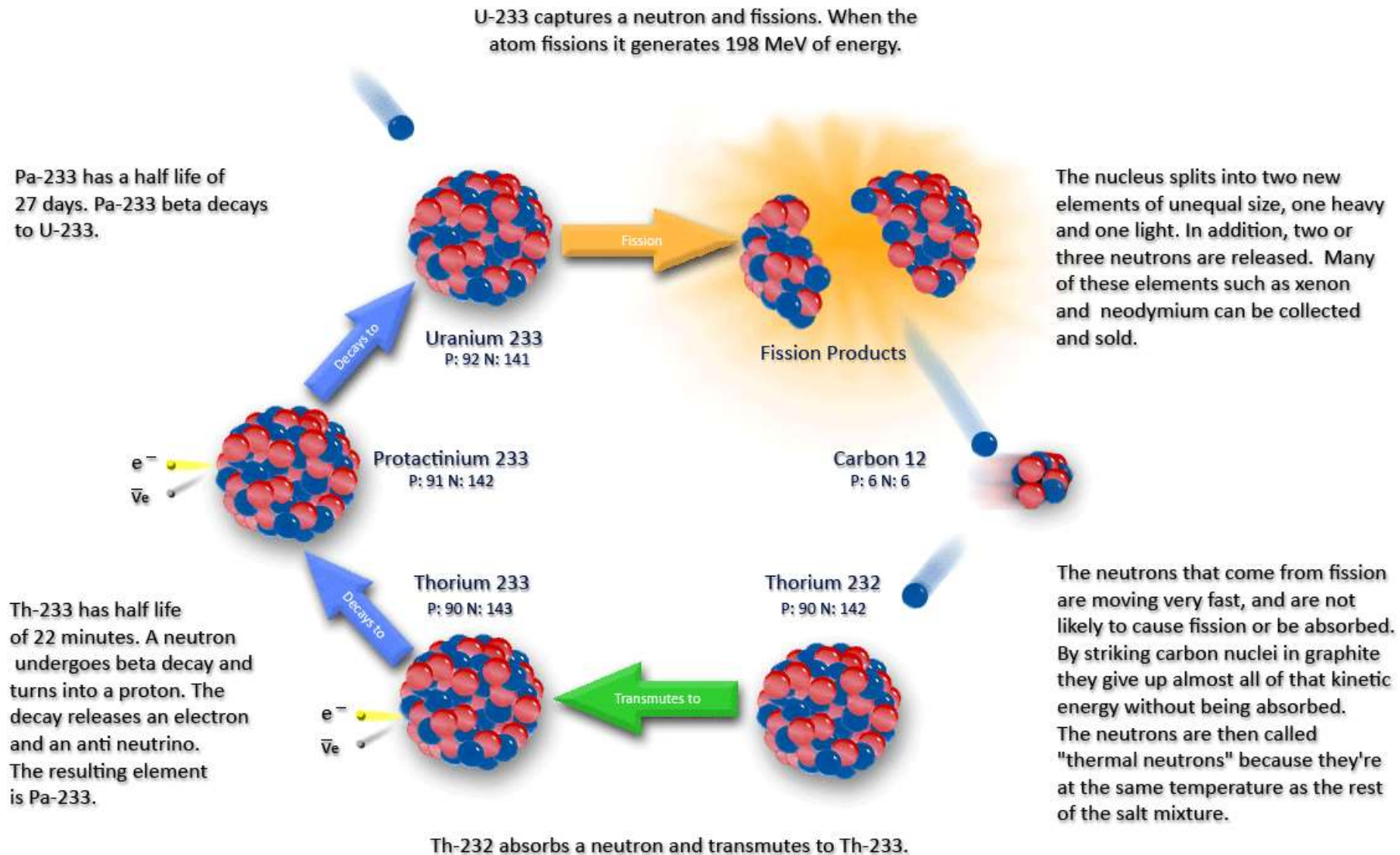
- ▶ 1960-1980: travail expérimental limité sur l'utilisation du thorium dans les HTR (DRAGON, ATR, THTR, carbure de Th-U et combustibles oxydes) et dans le BWR de Lingen par SIEMENS (Th-MOX)
- ▶ 1990-2002: projet EURATOM « Le cycle thorium en tant qu'option de gestion des déchets »
- ▶ 1998-2008: expériences sur les combustibles thorium (Projets THORIUM CYCLE, OMICO, LWR-DEPUTY avec irradiations à KWO-Obrigheim, HFR et BR2)
- ▶ FP7 (2011-13): Etude faisabilité sur le stockage géologique dans le cadre de l'utilisation du thorium (SKIN Project)
- ▶ FP5-FP7 (1998-maintenant): études des combustibles thorium et définition d'un réacteur à sels fondus (Projets MOST, ALISIA, EVOL...)



-
- ▶ Le thorium
 - ▶ Historique
 - ▶ **Cycle du thorium**
 - ▶ Les types de réacteurs
 - ▶ Les déchets / retraitement
 - ▶ Prolifération
 - ▶ Destruction des déchets
 - ▶ Perspectives
-



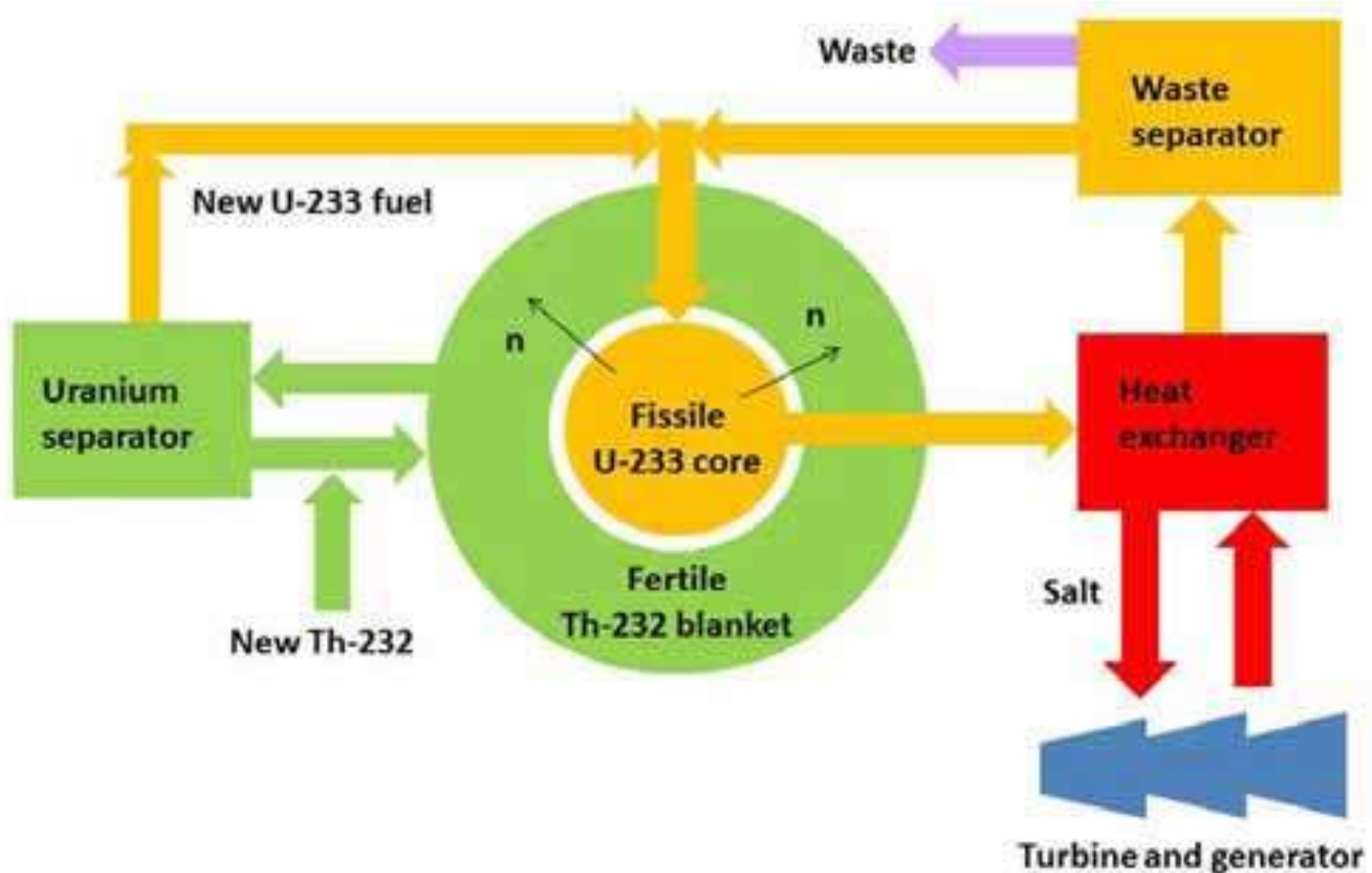
Thorium – Uranium Cycle



-
- ▶ Le thorium
 - ▶ Historique
 - ▶ Cycle du thorium
 - ▶ **Les types de réacteurs**
 - ▶ Les déchets / retraitement
 - ▶ Prolifération
 - ▶ Destruction des déchets
 - ▶ Perspectives



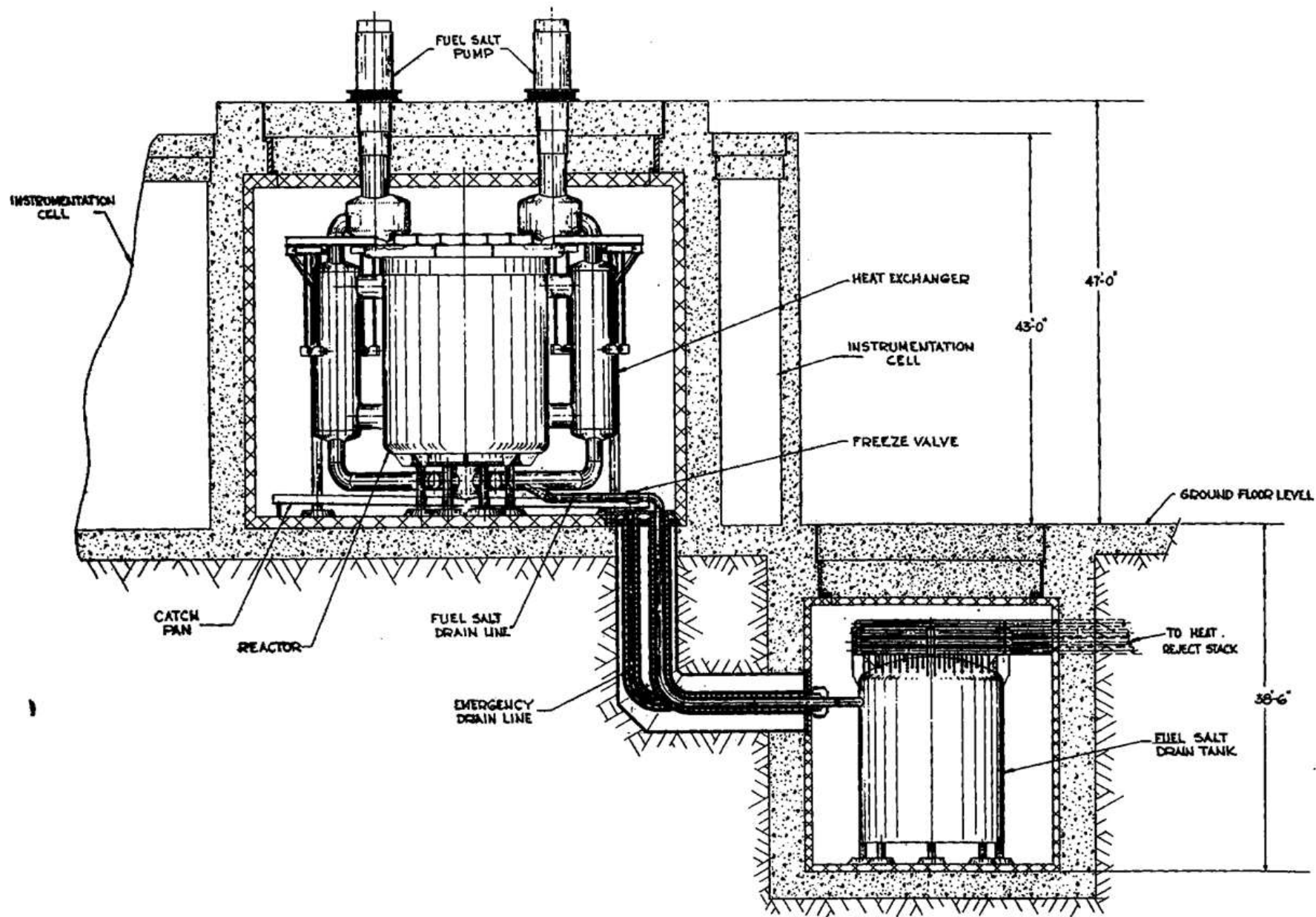
Principe du réacteur à sels fondus



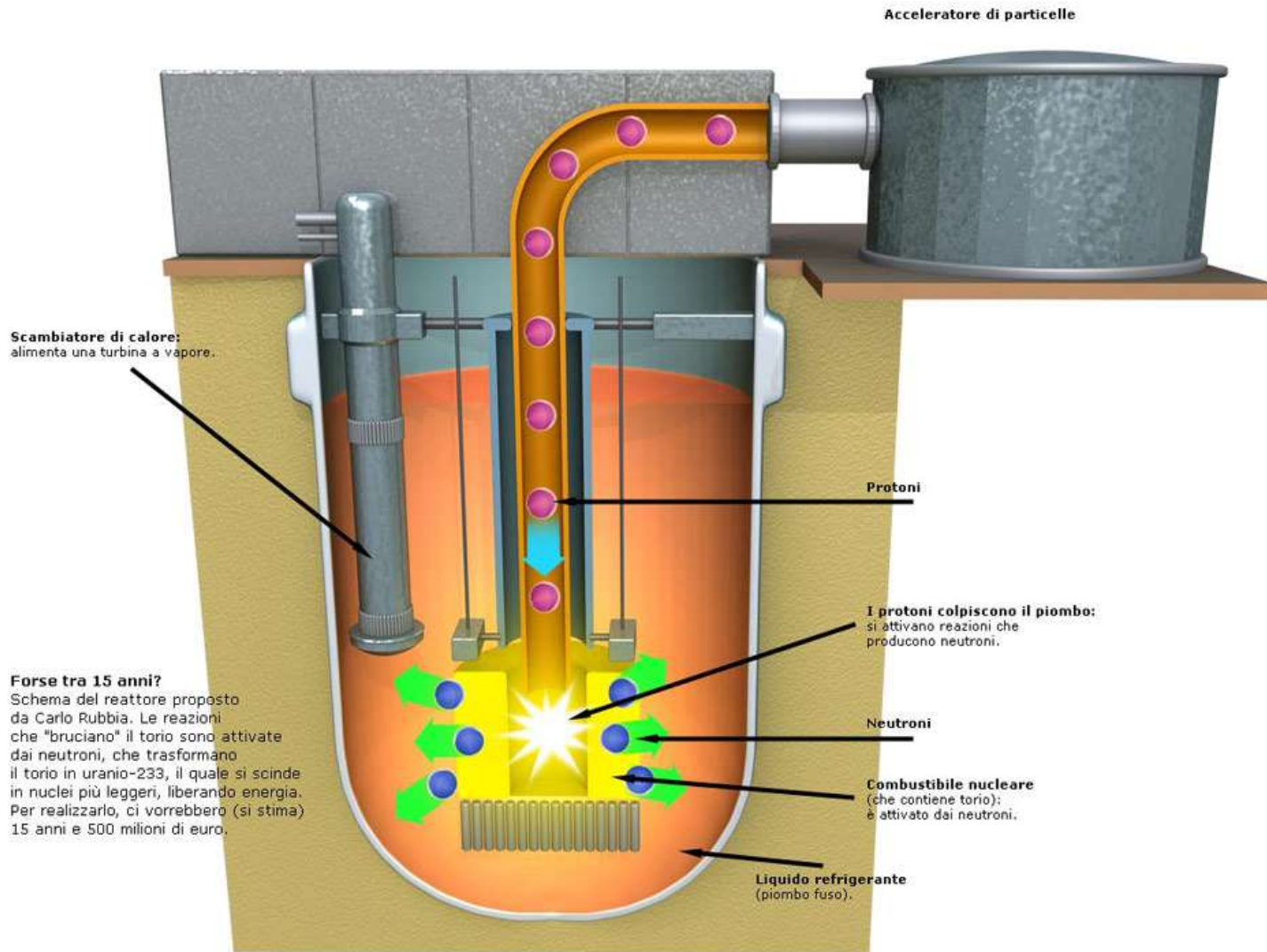
Caractéristiques des systèmes à sels fondus

- ▶ Fusion du cœur impossible
- ▶ Régulation de température passive (dilatation du combustible, doppler broadning)
- ▶ Fonctionnement à pression ambiante
- ▶ Les sels fondus ont d'excellentes caractéristiques thermiques et physiques
- ▶ Grande réactivité à la charge (< 60 secondes)
- ▶ Meilleur rendement thermodynamique
- ▶ Faible production de déchets à longue vie
- ▶ Modularité
- ▶ Pas d'enrichissement du combustible

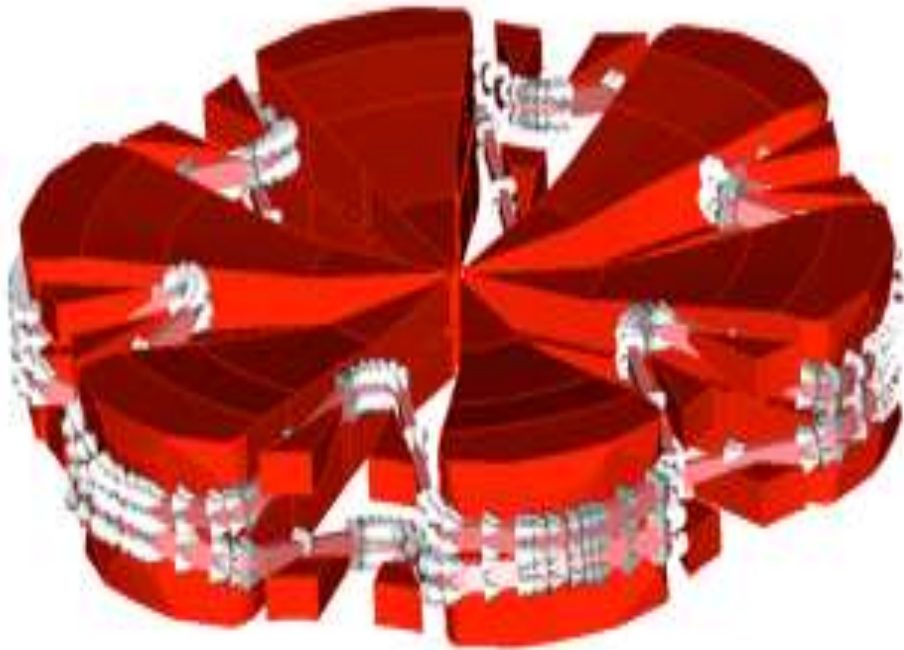




Principe de l'Accelerator-Driven System (ADS)



CYCLOTRON SUPRACONDUCTEUR DE 600 MeV



Cyclotron supraconducteur à triple source

Applications:

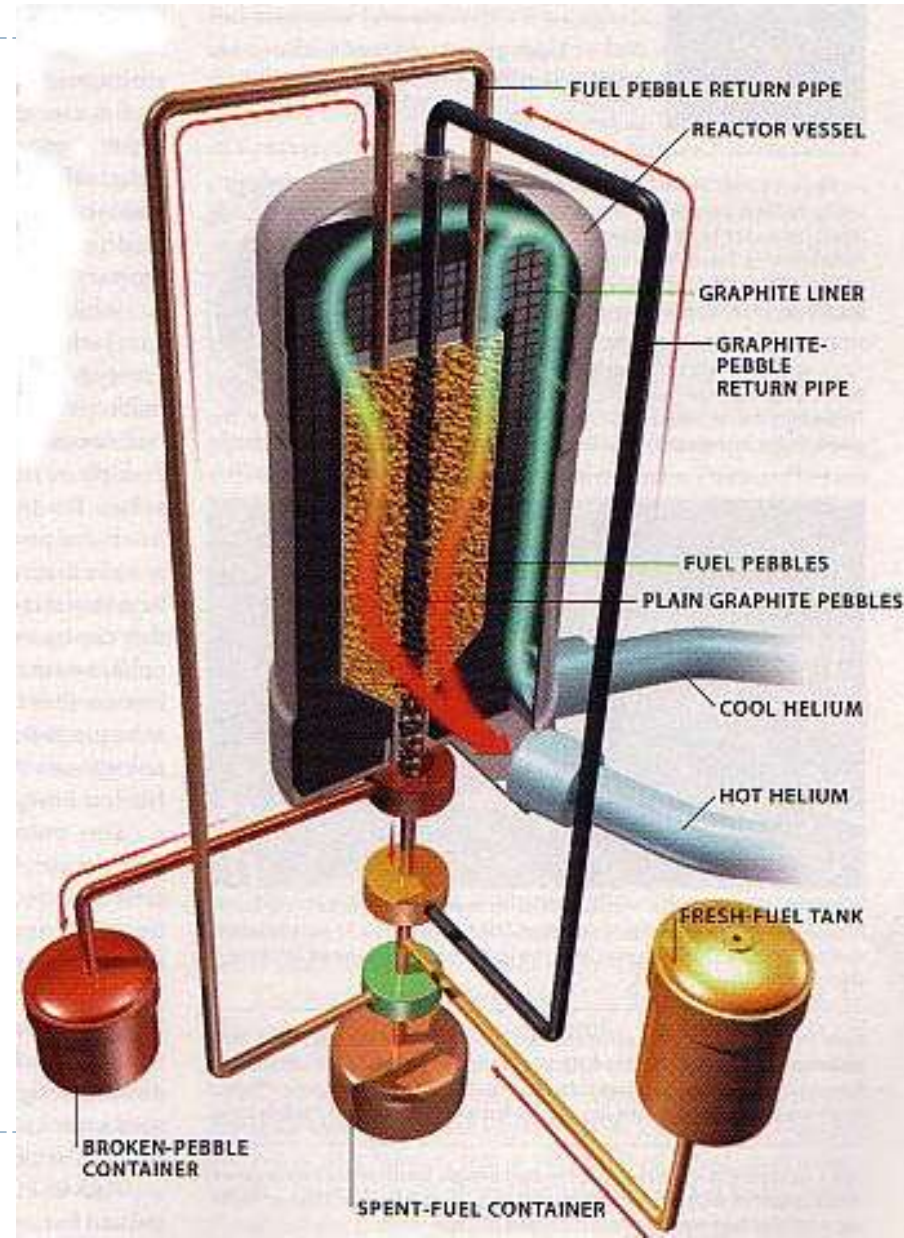
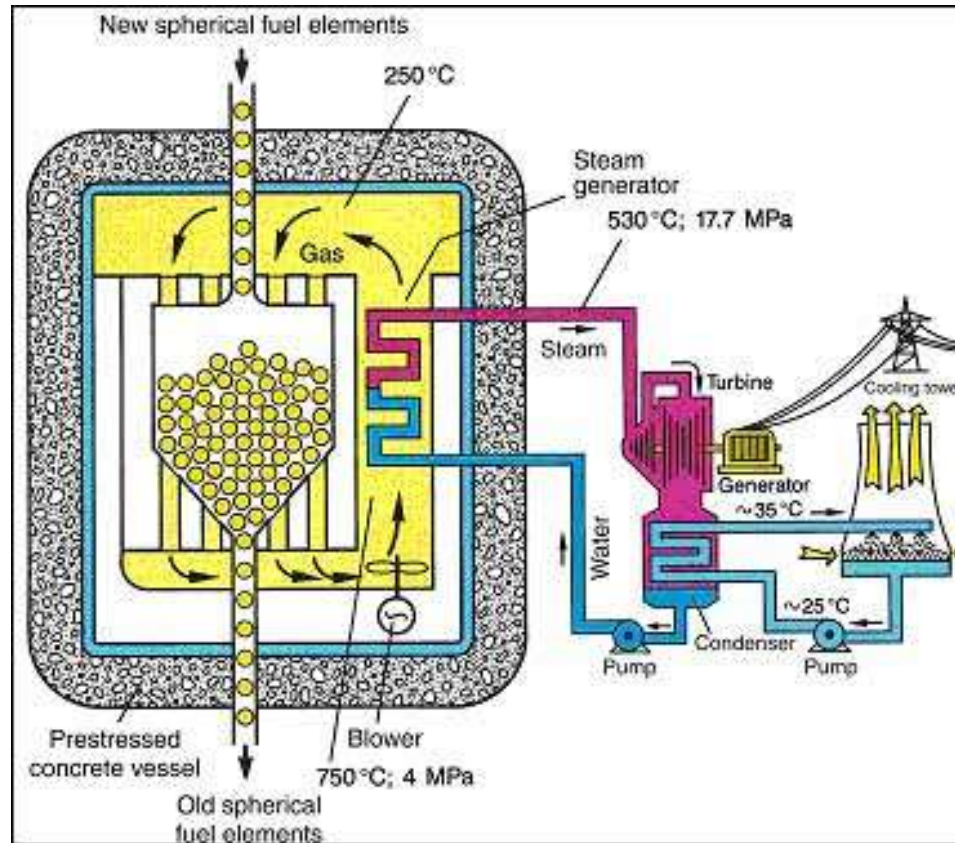
- ADS
- Radioisotopes pour la médecine
- Diverses applications industrielles

Caractéristiques des systèmes pilotés par accélérateur (ADS)

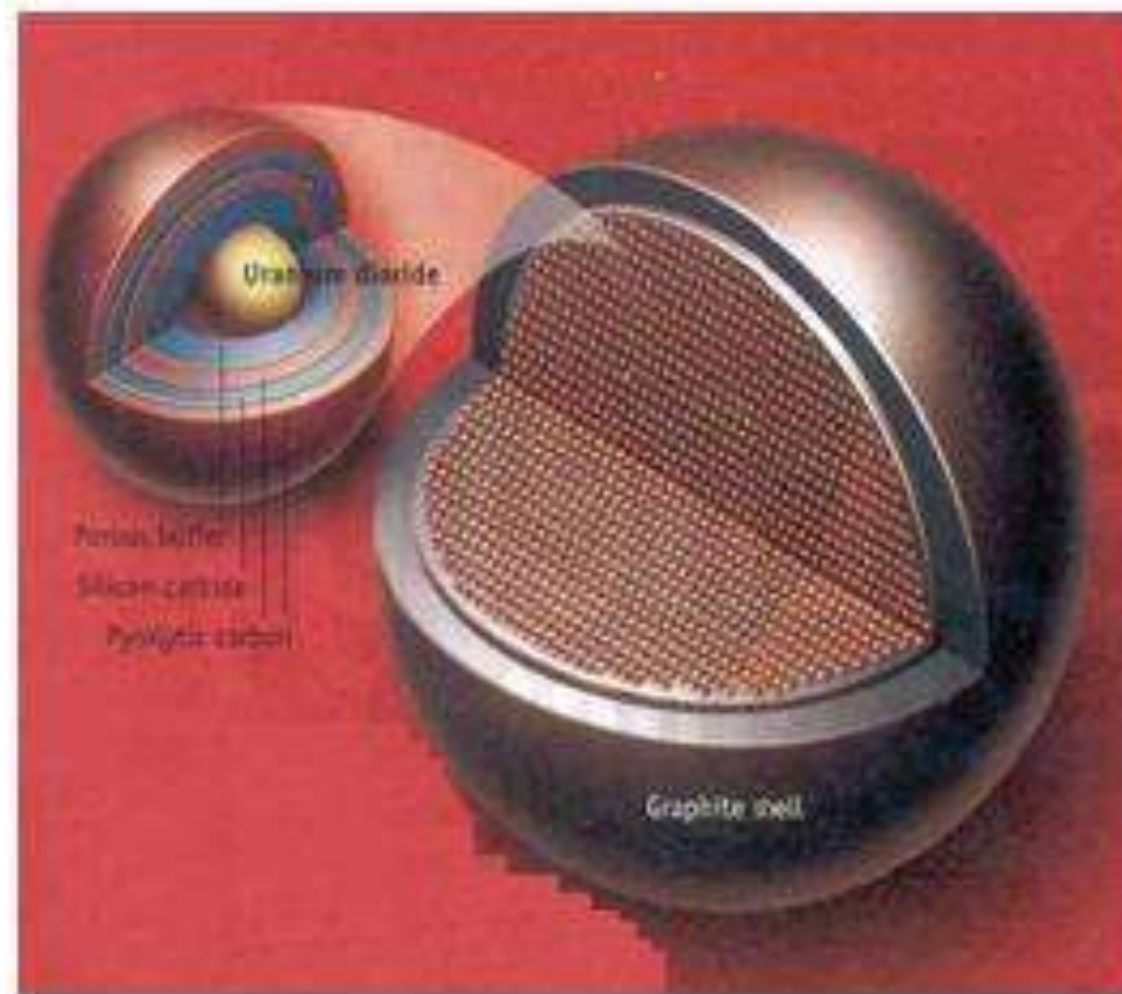
- ▶ Réacteur en état constant d'extinction (sous-critique)
- ▶ Régulation de température passive (dilatation du combustible, doppler broadning)
- ▶ Fonctionnement à pression ambiante
- ▶ Caractéristiques protectrices du liquide caloporteur (Pb-Bi)
- ▶ Peut extraire la chaleur par convection naturelle
- ▶ Grande réactivité à la charge (< 60 secondes)
- ▶ Meilleur rendement thermodynamique
- ▶ Faible production de déchets à longue vie
- ▶ Modularité
- ▶ Grande capacité à détruire les déchets nucléaires à longue vie
- ▶ Pas d'enrichissement du combustible



Réacteur à lit de boulets



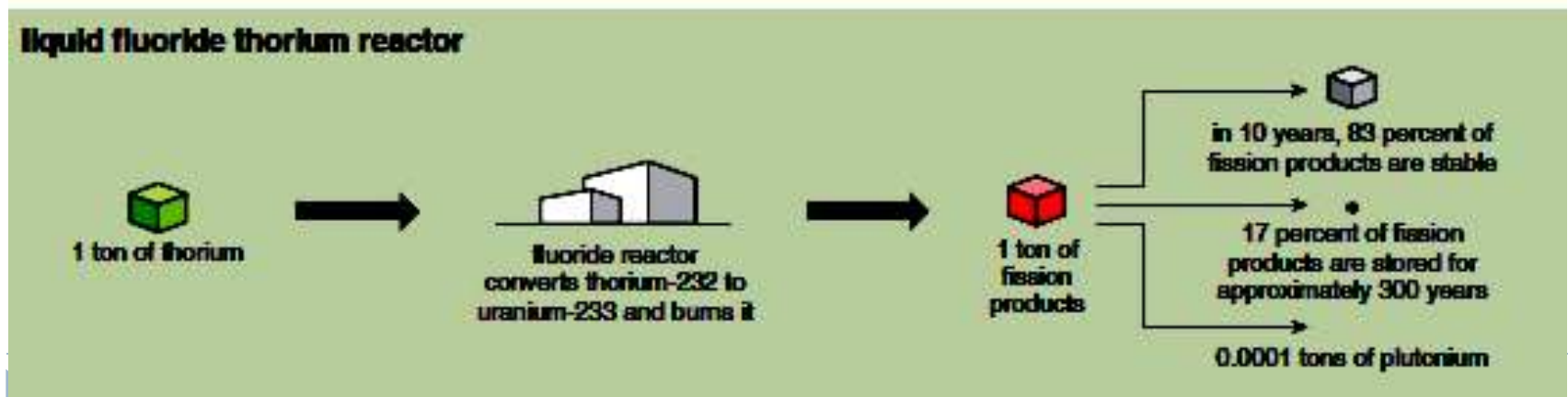
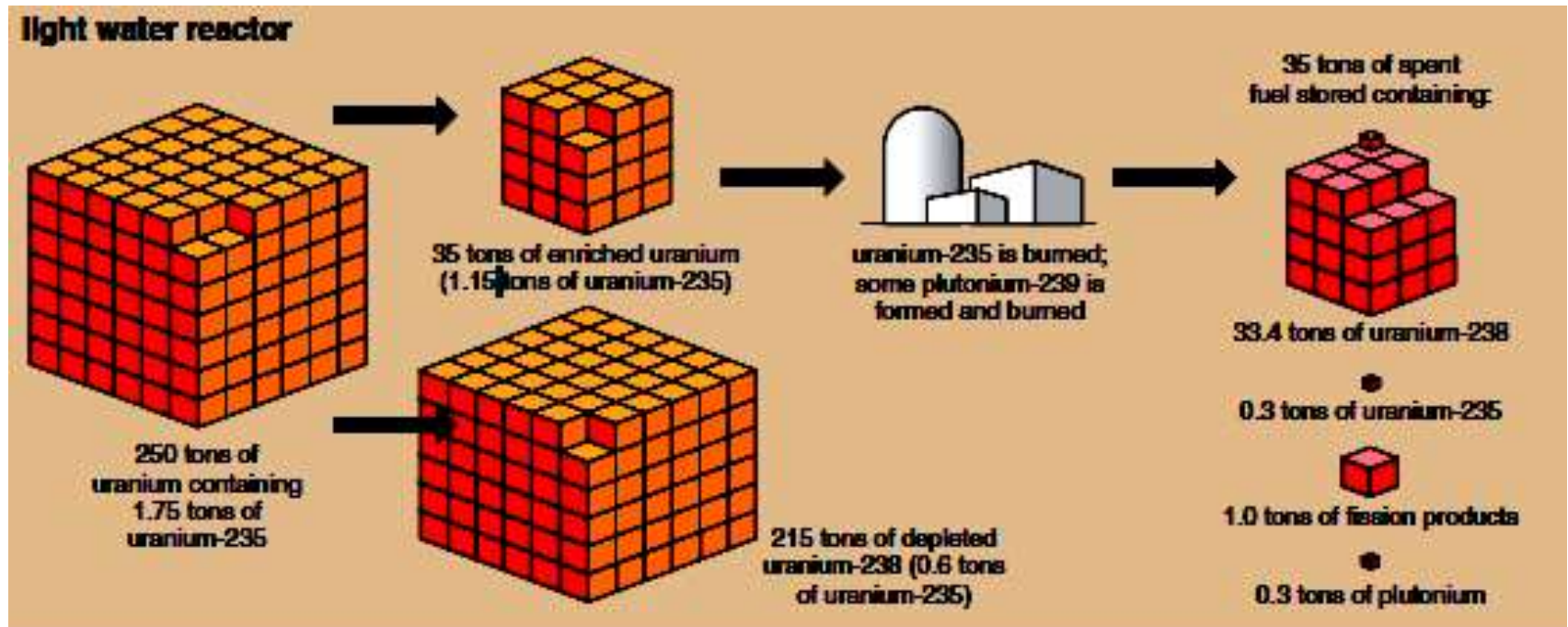
Réacteur à lit de boulets



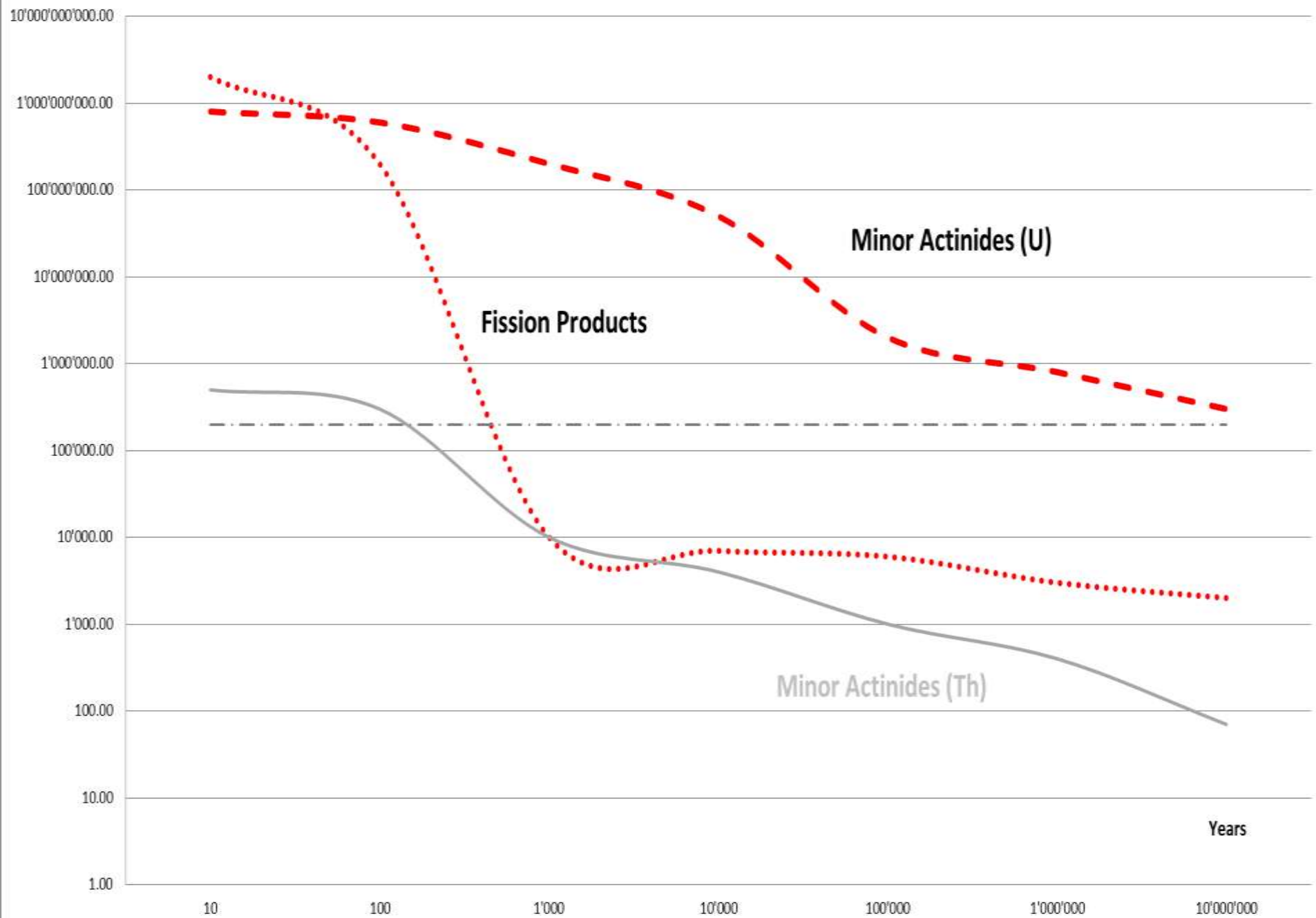
-
- ▶ Le thorium
 - ▶ Historique
 - ▶ Cycle du thorium
 - ▶ Les types de réacteurs
 - ▶ **Les déchets / retraitement**
 - ▶ Prolifération
 - ▶ Destruction des déchets
 - ▶ Perspectives
-



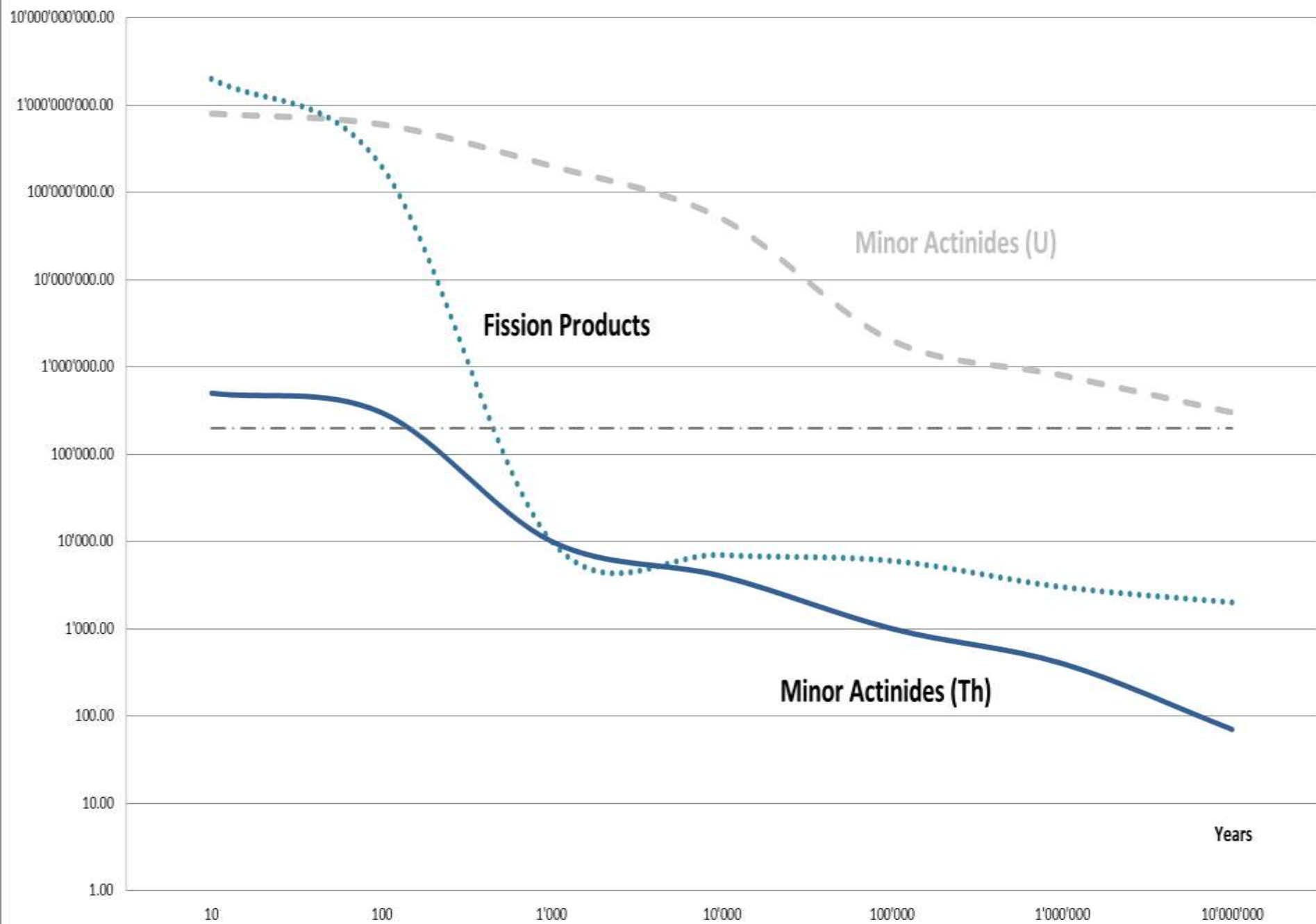
Déchets nucléaires: Uranium vs. Thorium

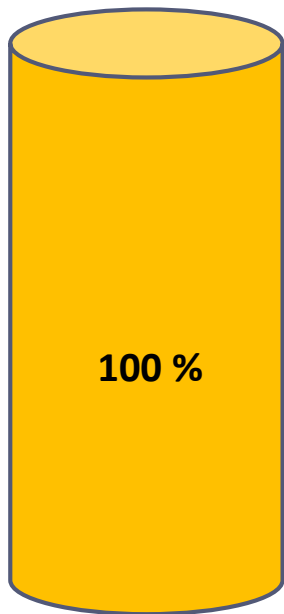


Waste Radiotoxicity as a function of time



Waste Radiotoxicity as a function of time





100 %

$t = 0$



17 %

10 ans



0 %

300 - 500 ans

Stabilisé et prêt pour le retraitement

prouvent
vices!
G
ht zu Ihrer
keiten.
verlangen.
ere to assist
its use.
or help.
LA DIRECTION

HEY!

**EINE
PET-FLASCHE
ÜBERLEBT IN DEN
BERGEN MEHR ALS
500 JAHRE!**

#EnjoyAndRespect

Mit Unterstützung der
Tierecke Regensburg


summit
FOUNDATION
ECOLOGICAL SOLUTIONS



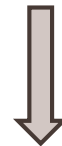
-
- ▶ Le thorium
 - ▶ Historique
 - ▶ Cycle du thorium
 - ▶ Les types de réacteurs
 - ▶ Les déchets / retraitement
 - ▶ **Prolifération**
 - ▶ Destruction des déchets
 - ▶ Perspectives



Résistance à la Prolifération

Quantité de Pu très faible

U233 peut être dénaturé avec de l'U238



γ radiation 2.6 MeV



Prolifération

- ▶ La réaction de fertilisation sur l'uranium naturel crée de grandes quantités de Pu et a donc des conséquences sécuritaires;
- ▶ La fertilisation du thorium est moins problématique:
 - ▶ Les trois éléments principaux à l'extraction du réacteur, soit U, Np et Pu-238, ne sont pas appropriés pour une arme nucléaire

Element	Bomb grade Pu-239	Uranium (U-233)	Neptunium ⁽³⁾ (Np-237)	Plutonium ⁽³⁾ (Pu-238)
Critical mass (CM), kg	3	28.0	56.5	10.4
Decay heat ⁽¹⁾ for CM, Watt	8	380	1.13	4400
Gamma Activity, Ci/CM	negligible	1300	small	small
Neutron Yield ⁽²⁾ , n g ⁻¹ s ⁻¹	66	3000	2.1 10 ⁵	2600

(1) Equilibrium temperature ≈ 190 °C for 100 W, due to presence of HP explosive shield

(2) Neutron yield must be ≤ 1000 n g⁻¹ s⁻¹

(3) Very small amounts produced at discharge

-
- ▶ Le thorium
 - ▶ Historique
 - ▶ Cycle du thorium
 - ▶ Les types de réacteurs
 - ▶ Les déchets / retraitement
 - ▶ Prolifération
 - ▶ **Destruction des déchets**
 - ▶ Perspectives



DESTRUCTION DES DECHETS NUCLÉAIRES

Concept: il s'agit de la transformation d'une grande partie de la source à longue durée de la radioactivité, radiotoxicité et de chaleur, à savoir:

Le plutonium (Pu)

Les actinides mineurs (MA: Np, Am, Cm)

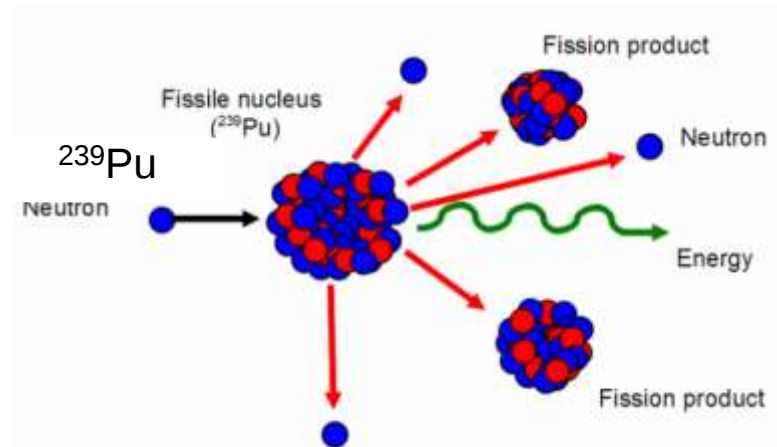
Les fragments de fission à longue durée de vie (Tc_{99} , I_{129} , Cs_{135} , $Sn_{126}, \dots$)

En éléments stables ou à courte durée de vie (< 30 ans), principalement des noyaux légers.

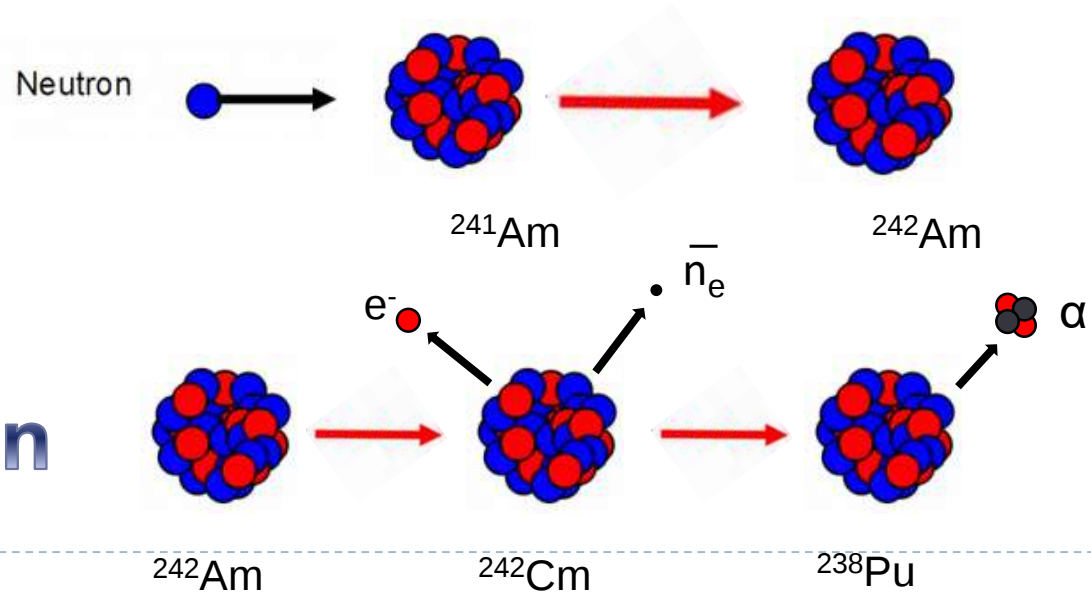


DESTRUCTION DES DECHETS NUCLÉAIRES

Fission



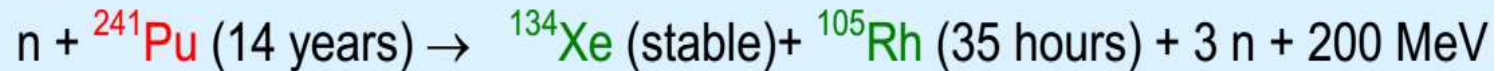
Capture



désintégration
 β , α

DESTRUCTION DES DECHETS NUCLÉAIRES

EXEMPLES



-
- ▶ Le thorium
 - ▶ Historique
 - ▶ Cycle du thorium
 - ▶ Les types de réacteurs
 - ▶ Les déchets / retraitement
 - ▶ Prolifération
 - ▶ Destruction des déchets
 - ▶ **Perspectives**
-
- 

300 MW - India

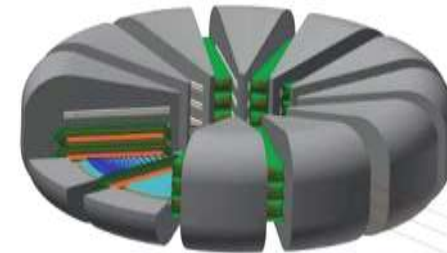
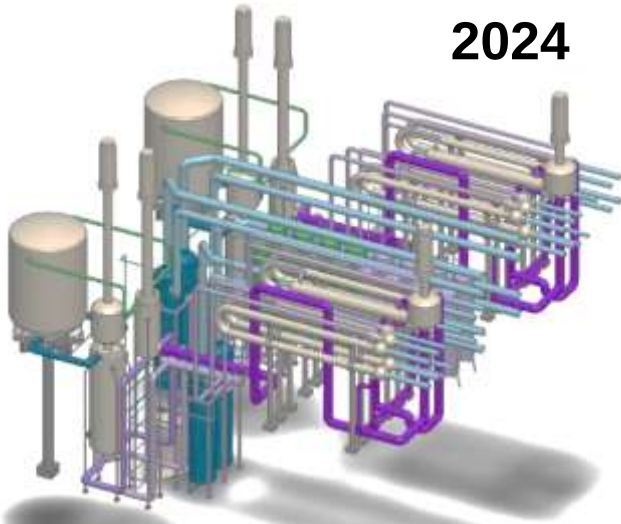


Réacteur à lit de
boulets pour **2024**



Prévu pour **2030**

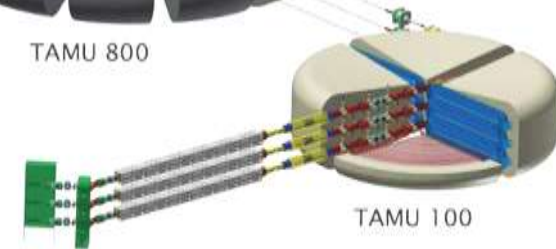
La Chine intéressée aux sels
fondus pour la chaleur
industrielle, hydrogène;
démonstrateur de **100 MW en
2024**



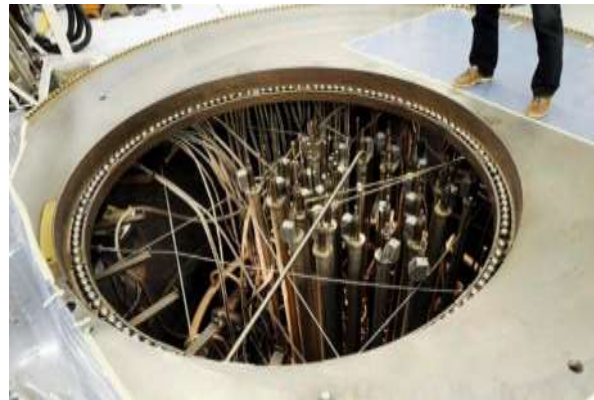
Other applications:

- Neutron radiation
- Medical Isotope P
- Proton Therapy
- Muon Cooling

TAMU 800



TAMU 100



Test à Halden

Cyclotron:
2 – étapes, triple source
superconducting

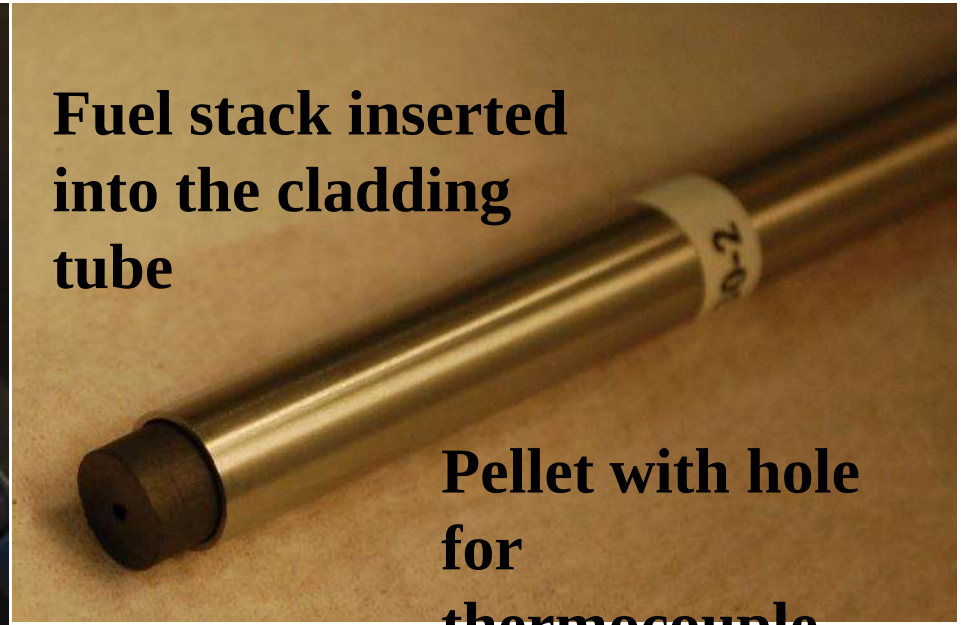
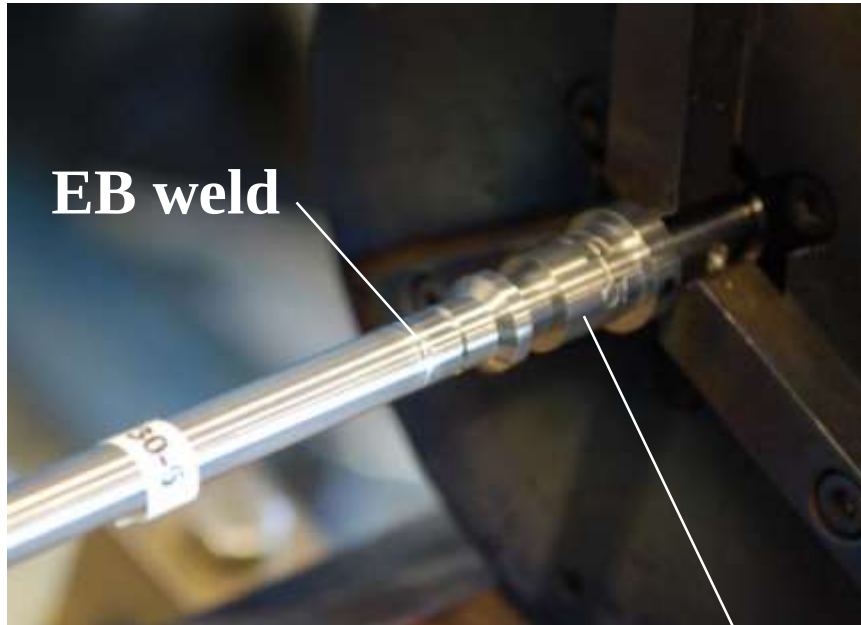
Fluor Energy, **USA**, TMSR

Recherches sur l'**ADS world-wide**: Europe
(Myrrha) Japan, India, China, Korea, Russia, UK,...

Test de Halden



Halden: IFA-730 crayon-test





16/04/2013

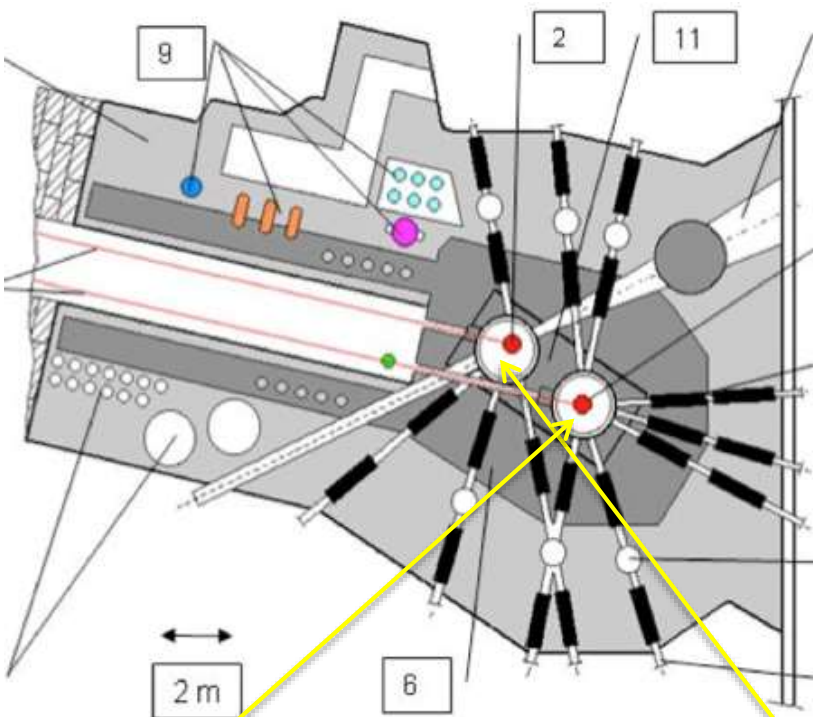




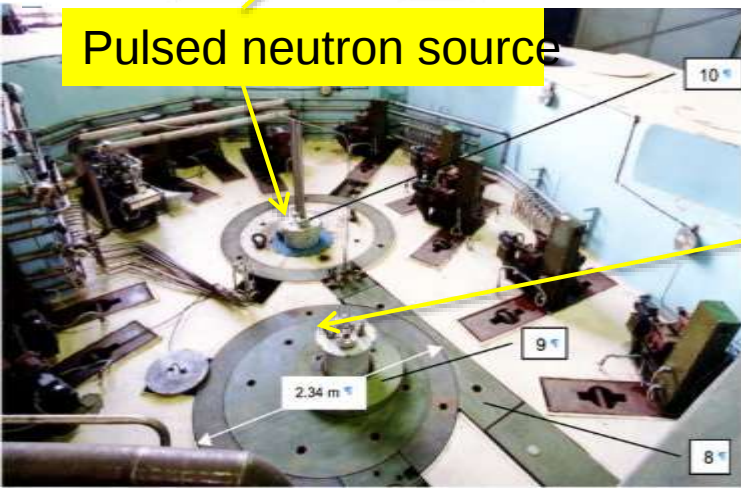
Le LINAC



The target area



Pulsed neutron source



ADS experimental cell



Thorium Energy Conference
ThEC13

Bringing the world's
main actors together

October 27-31, 2013,
ETH Zurich of Innovation,
Zurich, Switzerland

Thorium Energy Conference
ThEC13

Bringing the world's
main actors together

October 27-31, 2013