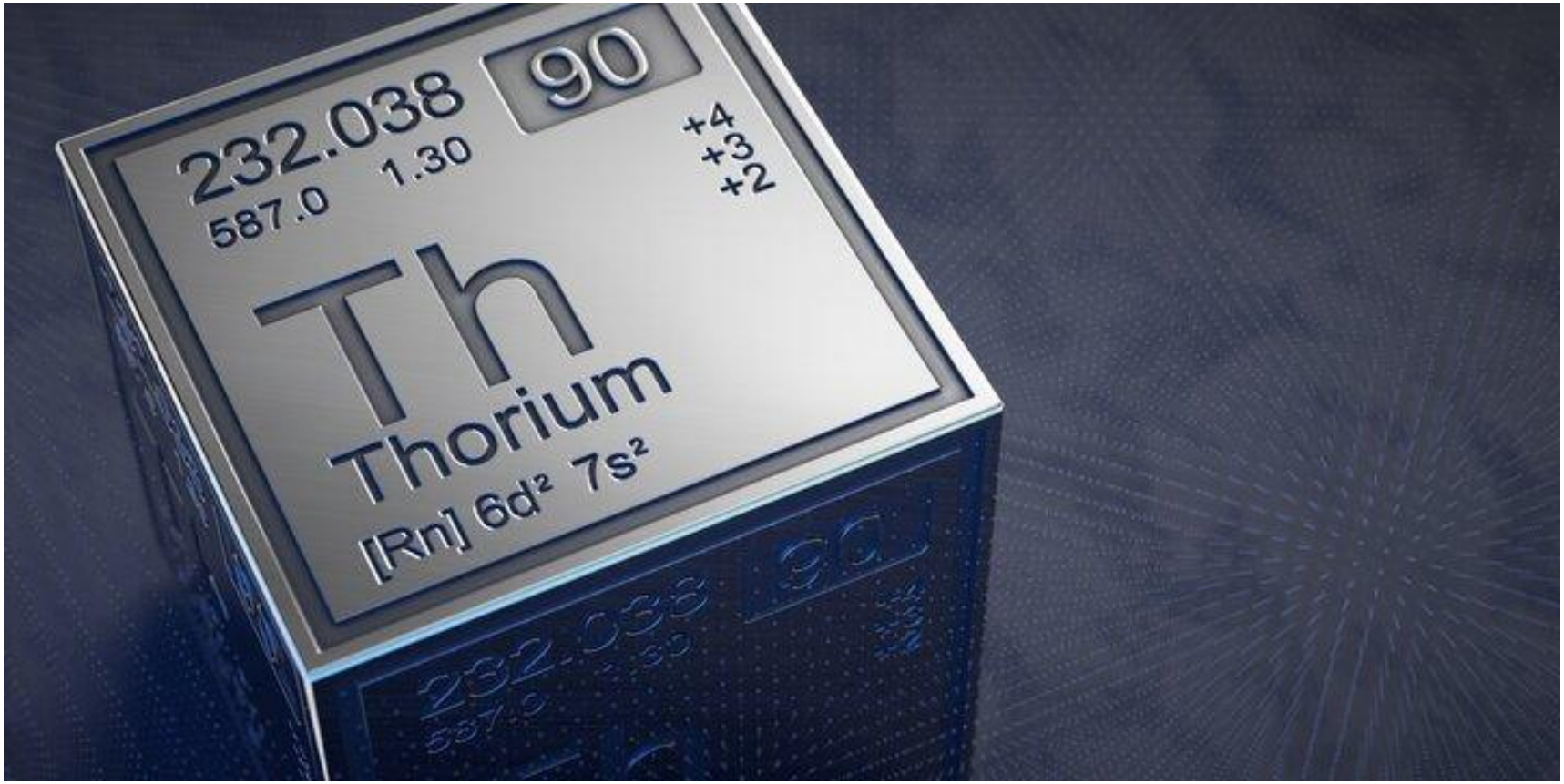
Le nucléaire vert et la transmutation, de l'utopie à la réalité



Jean-Christophe de Mestral

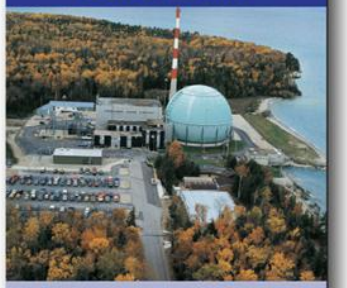
iThEC
INTERNATIONAL THORIUM ENERGY COMMITTEE

- **Generation IV**
- **Le Thorium**
- **Cycle du thorium**
- **Les types de réacteurs**
- **Les déchets / retraitement**
- **Transmutation**
- **Prolifération**
- **Coûts**
- **Perspectives**

- **Generation IV**
- Le Thorium: l'atome vert
- Cycle du thorium
- Les types de réacteurs
- Les déchets / retraitement
- Transmutation
- Prolifération
- Coûts
- Perspectives

Générations de réacteurs

Generation I



Big Rock Point, GE BWR

Early prototypes

- **Calder Hall** (GCR)
- **Douglas Point** (PHWR/CANDU)
- **Dresden-1** (BWR)
- **Fermi-1** (SFR)
- **Kola 1-2** (PWR/VVER)
- **Peach Bottom 1** (HTGR)
- **Shippingport** (PWR)

Generation II



Diablo Canyon, Westinghouse PWR

Large-scale power stations

- **Bruce** (PHWR/CANDU)
- **Calvert Cliffs** (PWR)
- **Flamanville 1-2** (PWR)
- **Fukushima II 1-4** (BWR)
- **Grand Gulf** (BWR)
- **Kalinin** (PWR/VVER)
- **Kursk 1-4** (LWGR/RBMK)
- **Palo Verde** (PWR)

Generation III / III+



Kashiwazaki, GE ABWR



Olkiluoto 3 AREVA PWR

Evolutionary designs

- **ABWR** (GE-Hitachi; Toshiba BWR)
- **ACR 1000** (AECL CANDU PHWR)
- **AP1000** (Westinghouse-Toshiba PWR)
- **APR-1400** (KHNP PWR)
- **APWR** (Mitsubishi PWR)
- **Atmea-1** (Areva NP -Mitsubishi PWR)
- **CANDU 6** (AECL PHWR)
- **EPR** (AREVA NP PWR)
- **ESBWR** (GE-Hitachi BWR)
- **Small Modular Reactors**
  - B&W mPower PWR
  - CNEA CAREM PWR
  - India DAE AHWR
  - KAERI SMART PWR
  - NuScale PWR
  - OKBM KLT-405 PWR
- **VVER-1200** (Gidropress PWR)

Generation IV

Safe
Secure
Sustainable
Competitive
Versatile

Arriving ~ 2030

Innovative designs

- **GFR** gas-cooled fast reactor
- **LFR** lead-cooled fast reactor
- **MSR** molten salt reactor
- **SFR** sodium-cooled fast reactor
- **SCWR** supercritical water-cooled reactor
- **VHTR** very high temperature reactor

09-50898-01n

1950 1970 1990 2010 2030 2050 2070 2090

Réacteurs nucléaires Gen IV

- **la sûreté et la fiabilité** : systèmes de sécurité passifs et élimination des besoins d'évacuation de population à l'extérieur du site, quelles que soient la cause et la gravité de l'accident ;

- **la durabilité** : les réacteurs doivent être économes des ressources naturelles dont ils ont besoin, et respectueux de l'environnement (**minimisation de la production de déchets**) ;

- **la compétitivité économique** : aux plans du coût d'investissement, du coût du combustible, du coût d'exploitation de l'installation et de son démantèlement, et donc par voie de conséquence, du coût de production qui doit être compétitif par rapport à celui d'autres sources d'énergies ;

- **la résistance vis-à-vis de la prolifération nucléaire** (détournement de l'énergie nucléaire vers un usage militaire ou terroriste) et la capacité à être aisément protégés contre des agressions externes.

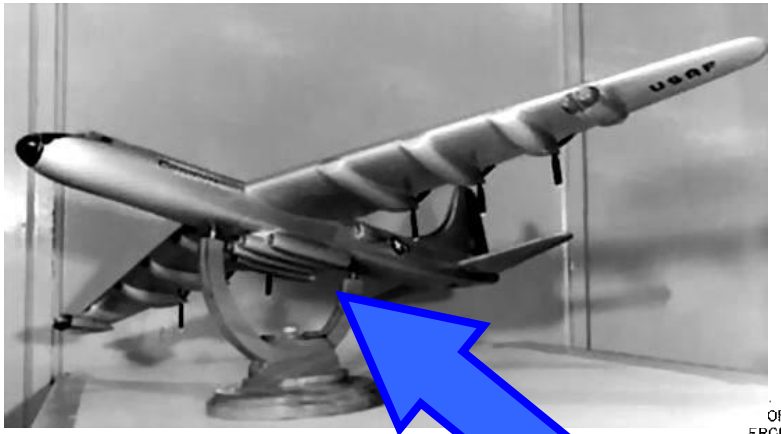
- Contexte et Gen IV
- **Le Thorium: l'atome vert**
- Cycle du thorium
- Les types de réacteurs
- Les déchets / retraitement
- Transmutation
- Prolifération
- Coûts
- Perspectives

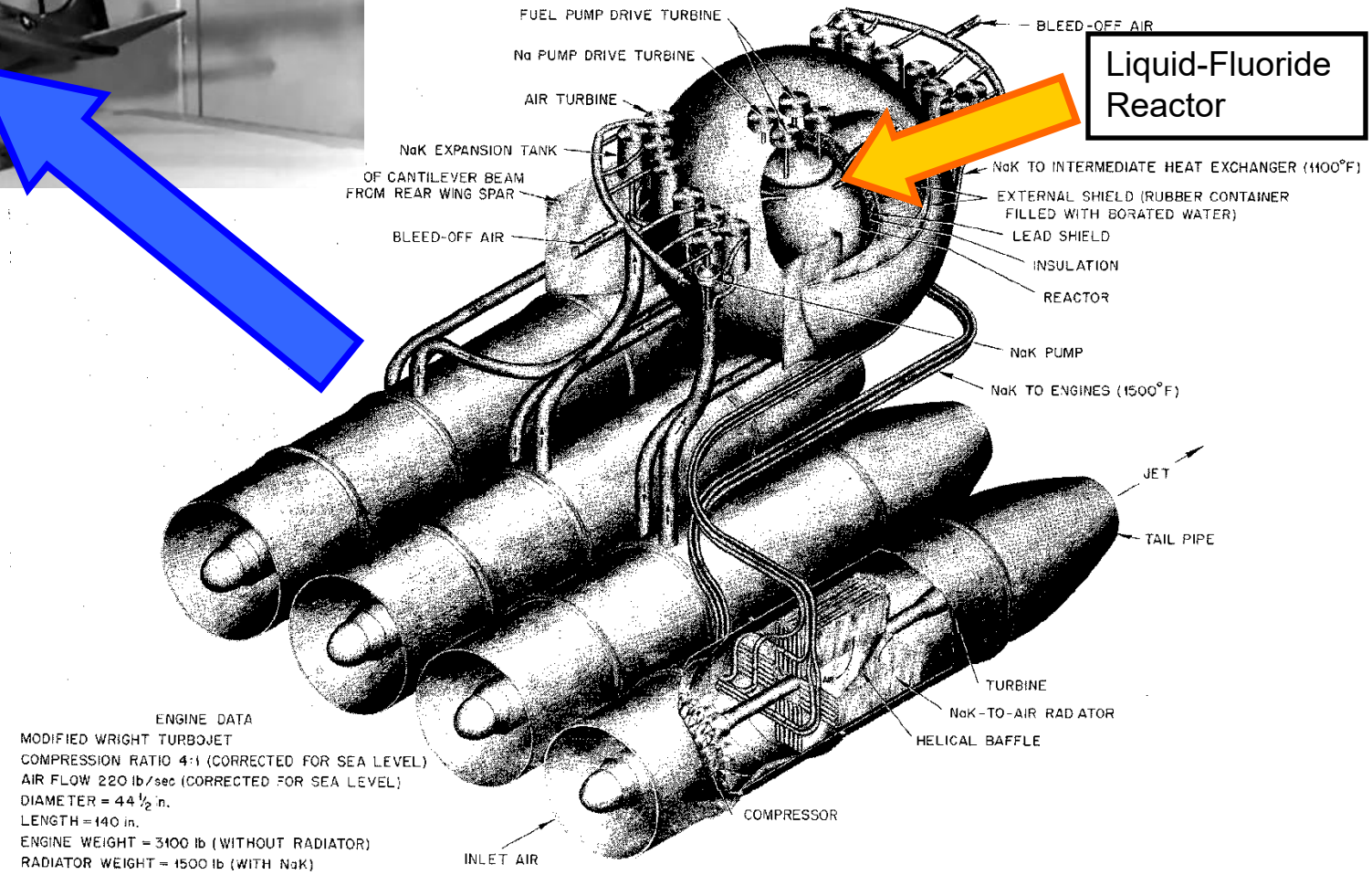


Alvin Weinberg

Director of Oak Ridge National Laboratory

- Convair B-36 X-6
  - quatre turbojets alimentés par un réacteur nucléaire
  - Réacteur thermique de 200 MW



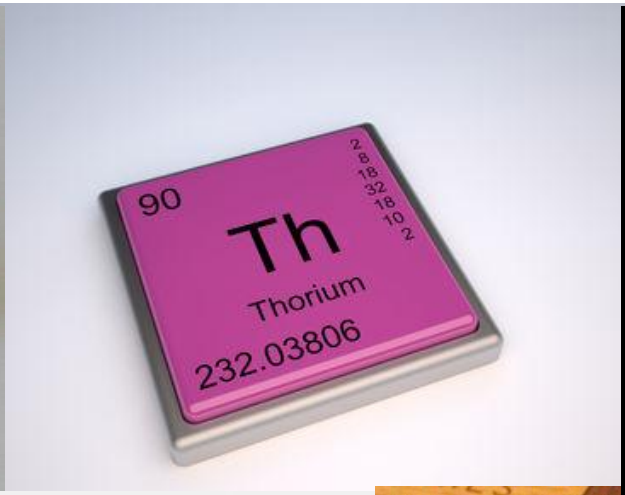


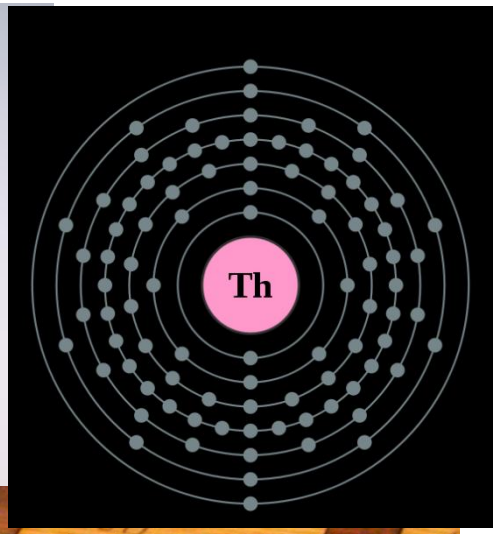
Liquid-Fluoride Reactor




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




90
Th
Thorium
232.03806
2
8
18
32
18
10
2


Th




58
Pr
PRASE
140.9
931
Th
THORIUM
232.0
11.7
50
4787


Thorium
© M. Stegemann 2003





Conteneurs de stockage de nitrate de thorium au Nevada

Country	Tonnes
India	846,000
Brazil	632,000
Australia	595,000
USA	595,000
Egypt	380,000
Turkey	374,000
Venezuela	300,000
Canada	172,000
Russia	155,000
South Africa	148,000
China	100,000
Norway	87,000
Greenland	86,000
Finland	60,000
Sweden	50,000
Kazakhstan	50,000
Other countries	1,725,000
World total	**6,355,000**

OECD/IAEA/ Uranium 2014

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
- Propriétés physiques excellentes, permettant des marges de sécurité plus hautes pour le fonctionnement (vs. U)
- "***le thorium est une source d'énergie essentiellement durable à l'échelle humaine***" (C. Rubbia)

Comparaison des alternatives

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



3,500,000 tonnes de charbon

Impact sur l'environnement significatif

En particulier, les émissions de CO2



200 tonnes d'uranium

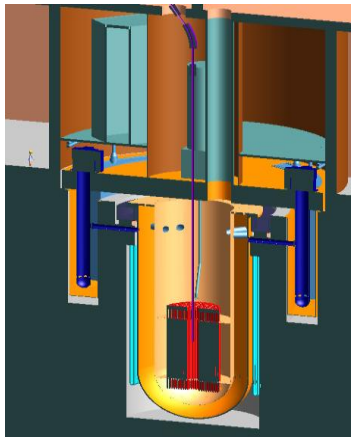
Faible impact CO2

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

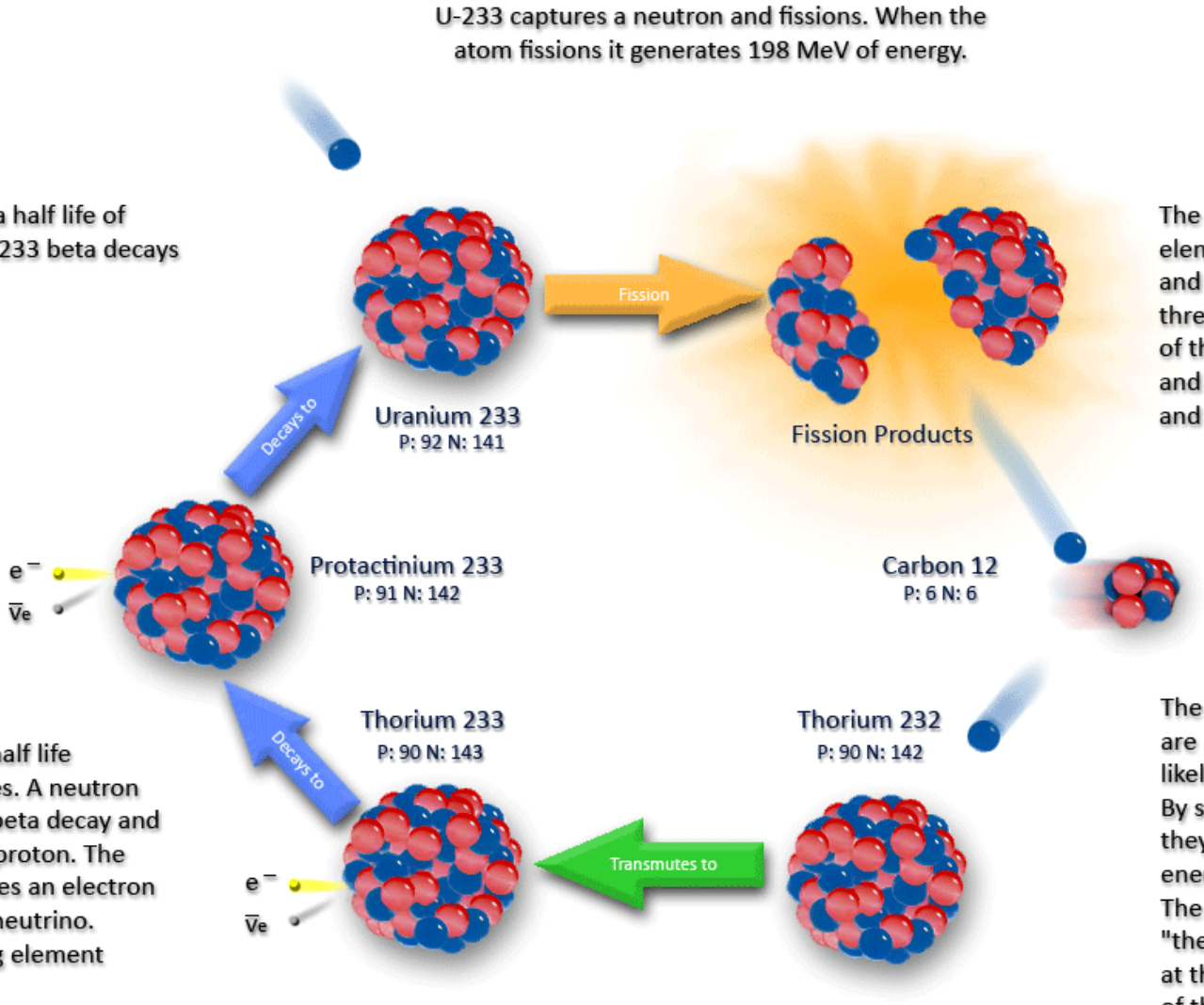
Déchets dangereux en quantité réduite et de durée beaucoup plus courte

Pas d'enrichissement

Risque de prolifération inférieur

- Contexte et Gen IV
- Le Thorium
- **Cycle du thorium**
- Les types de réacteurs
- Les déchets / retraitement
- Transmutation
- Prolifération
- Coûts
- Perspectives

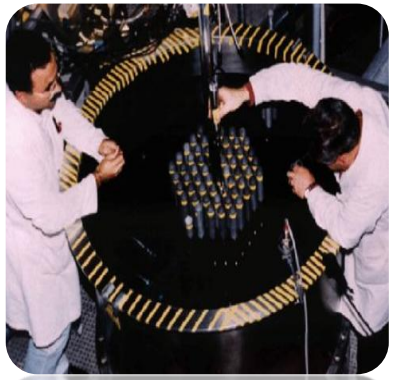
Thorium – Uranium Cycle



Bradley Nielsen 2010

Les bases scientifiques

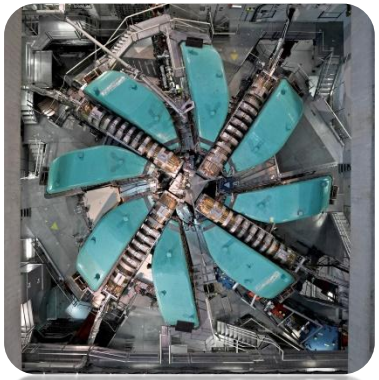
ADS
PROOF OF CONCEPT



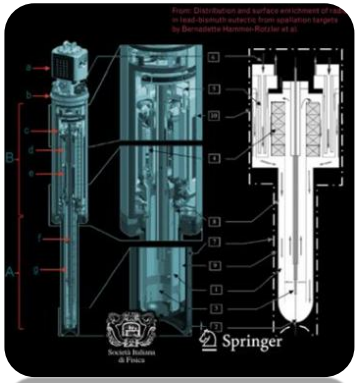
TRANSMUTATION OF
LONG-LIVED WASTE



HIGH-POWER
CYCLOTRON
(30+ YR OPERATION)



HIGH-POWER
SPALLATION TARGET
(6+ MO OPERATION)



MOLTEN LEAD REACTOR
(80,000 HRS OPERATION)



CERN

CERN

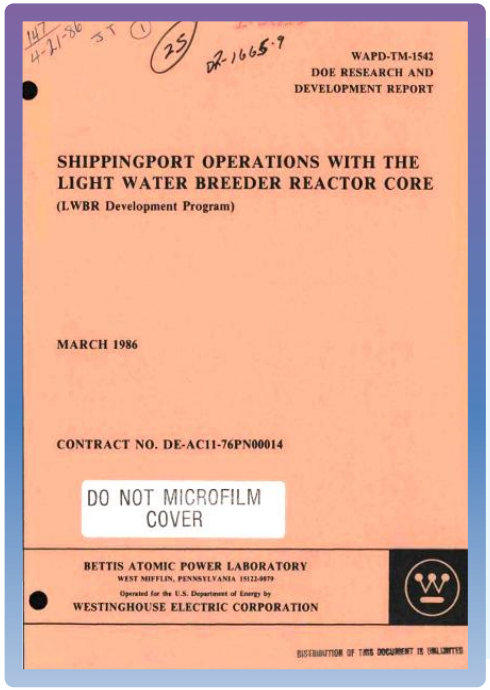
PAUL SCHERRER INSTITUT
PSI

PAUL SCHERRER INSTITUT
PSI

Alfa class
submarines

Transmutex (C) Confidential

L’utilisation du thorium a déjà été démontrée commercialement dans un réacteur à eau pressurisée



WAPD-TM-1542
DOE RESEARCH AND DEVELOPMENT REPORT

SHIPPINGPORT OPERATIONS WITH THE LIGHT WATER BREEDER REACTOR CORE
(LWBR Development Program)

MARCH 1986

CONTRACT NO. DE-AC11-76PN00014

DO NOT MICROFILM COVER

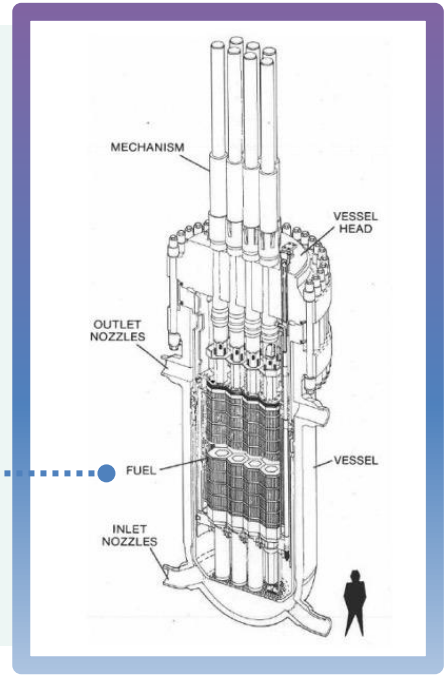
BETTIS ATOMIC POWER LABORATORY
WEST MIFFLIN, PENNSYLVANIA 15122-0079
Operated for the U.S. Department of Energy by
WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED

US Department of Energy Report [1]

“Such a breeder would have the advantage of utilizing the established technology of light water reactors and make available for power production about 50 percent of the energy potentially available in abundant **thorium** reserves. **This would provide the nation's total energy requirements for several centuries**.“ DOE - 1986

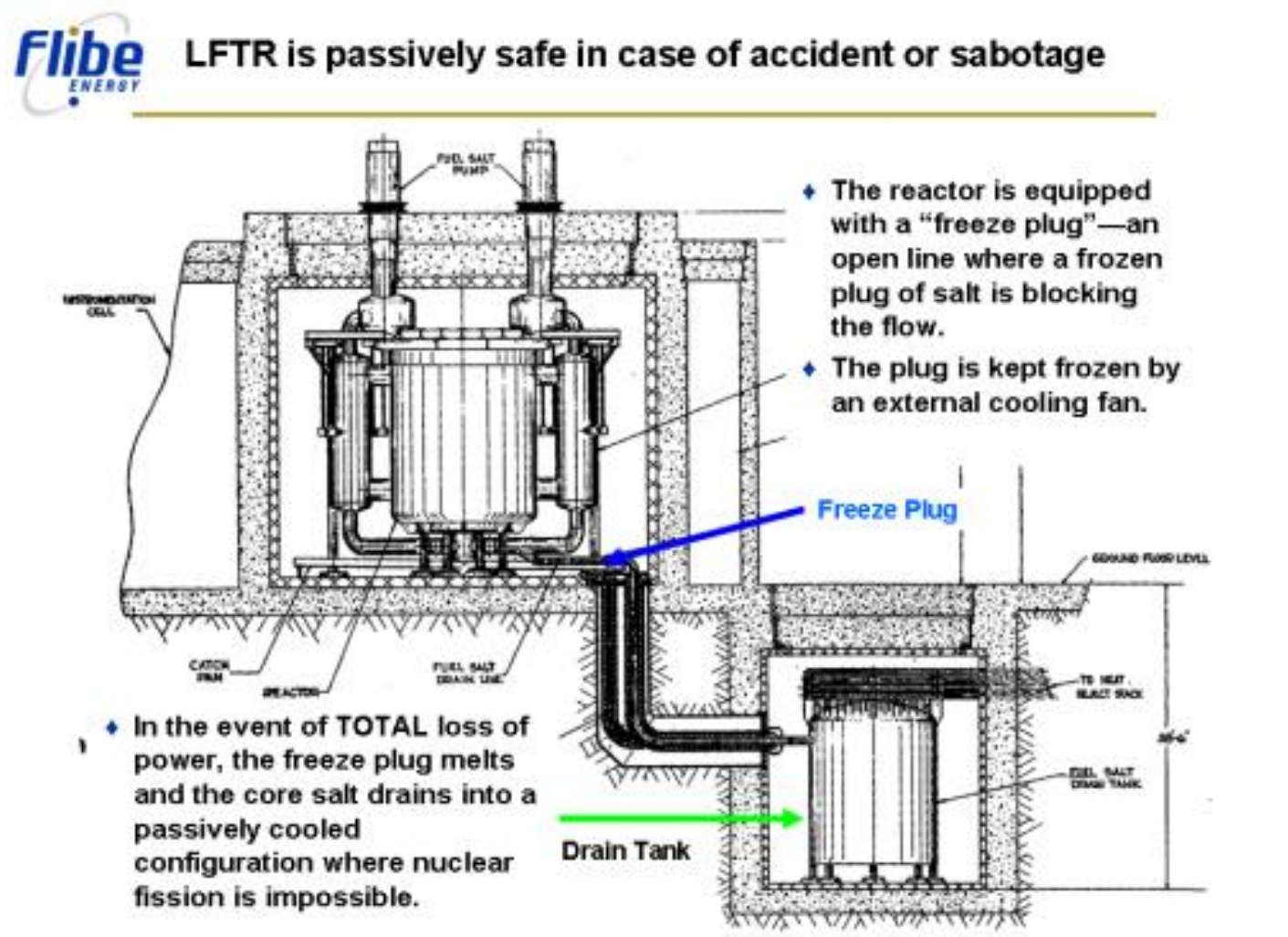
Shippingport, USA



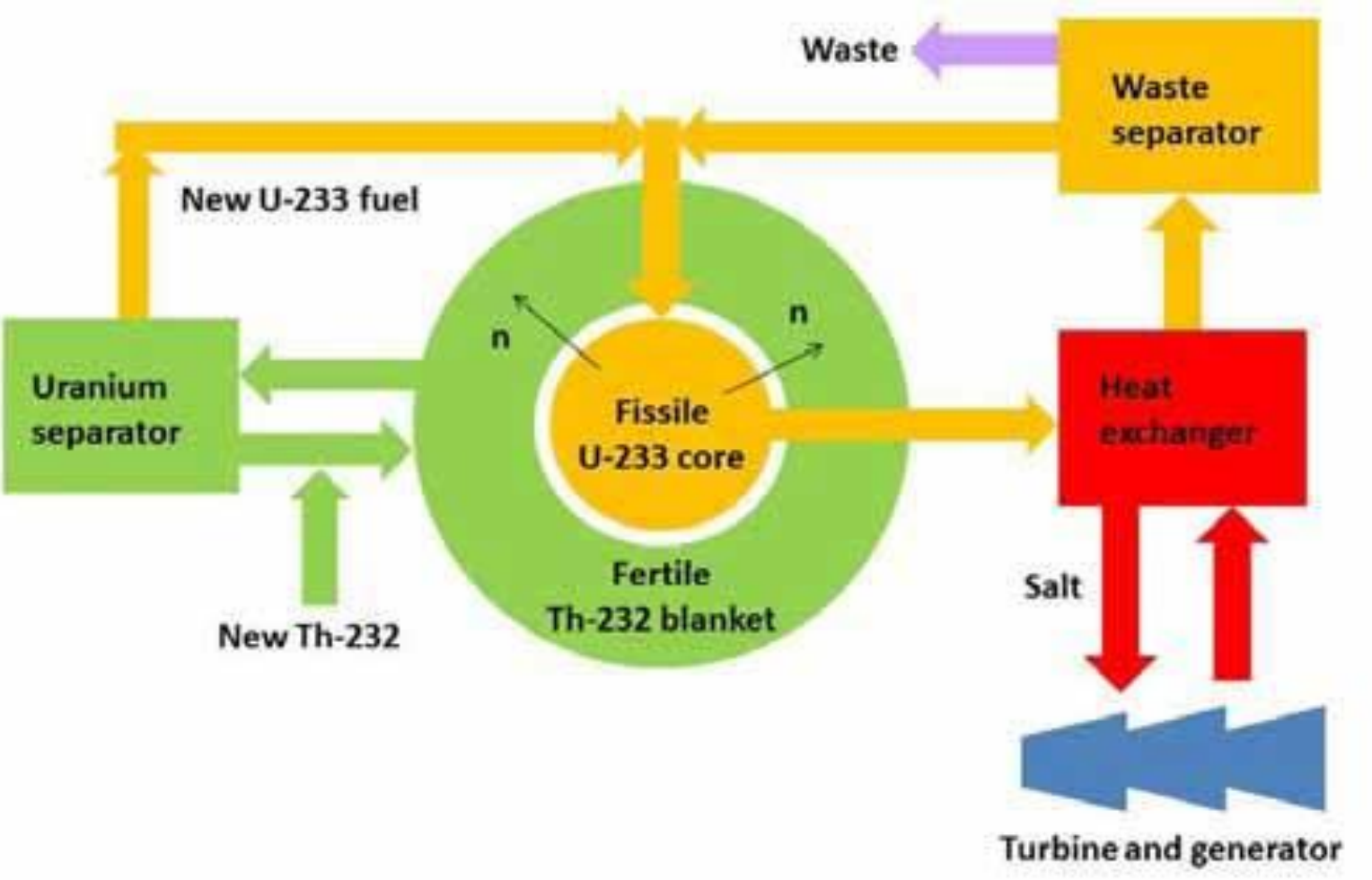
Shippingport Thorium Reactor [2]

- Contexte et Gen IV
- Le Thorium
- Cycle du thorium
- **Les types de réacteurs**
- Les déchets / retraitement
- Transmutation
- Prolifération
- Coûts
- Perspectives

Réacteur au thorium à sels fondus

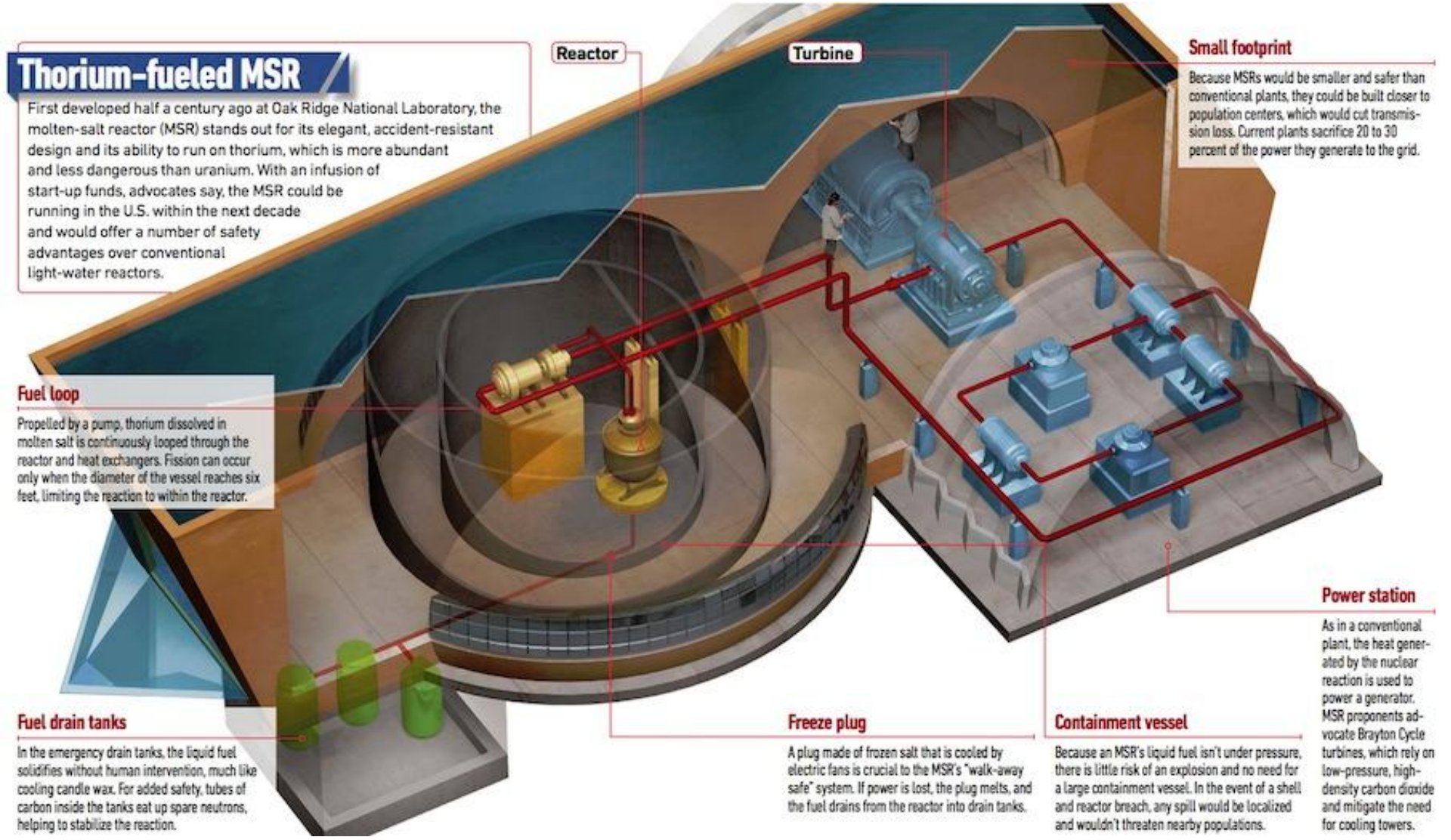


Principe du réacteur à sels fondus



Thorium-fueled MSR

First developed half a century ago at Oak Ridge National Laboratory, the molten-salt reactor (MSR) stands out for its elegant, accident-resistant design and its ability to run on thorium, which is more abundant and less dangerous than uranium. With an infusion of start-up funds, advocates say, the MSR could be running in the U.S. within the next decade and would offer a number of safety advantages over conventional light-water reactors.



Small footprint

Because MSRs would be smaller and safer than conventional plants, they could be built closer to population centers, which would cut transmission loss. Current plants sacrifice 20 to 30 percent of the power they generate to the grid.

Fuel loop

Propelled by a pump, thorium dissolved in molten salt is continuously looped through the reactor and heat exchangers. Fission can occur only when the diameter of the vessel reaches six feet, limiting the reaction to within the reactor.

Power station

As in a conventional plant, the heat generated by the nuclear reaction is used to power a generator. MSR proponents advocate Brayton Cycle turbines, which rely on low-pressure, high-density carbon dioxide and mitigate the need for cooling towers.

Fuel drain tanks

In the emergency drain tanks, the liquid fuel solidifies without human intervention, much like cooling candle wax. For added safety, tubes of carbon inside the tanks eat up spare neutrons, helping to stabilize the reaction.

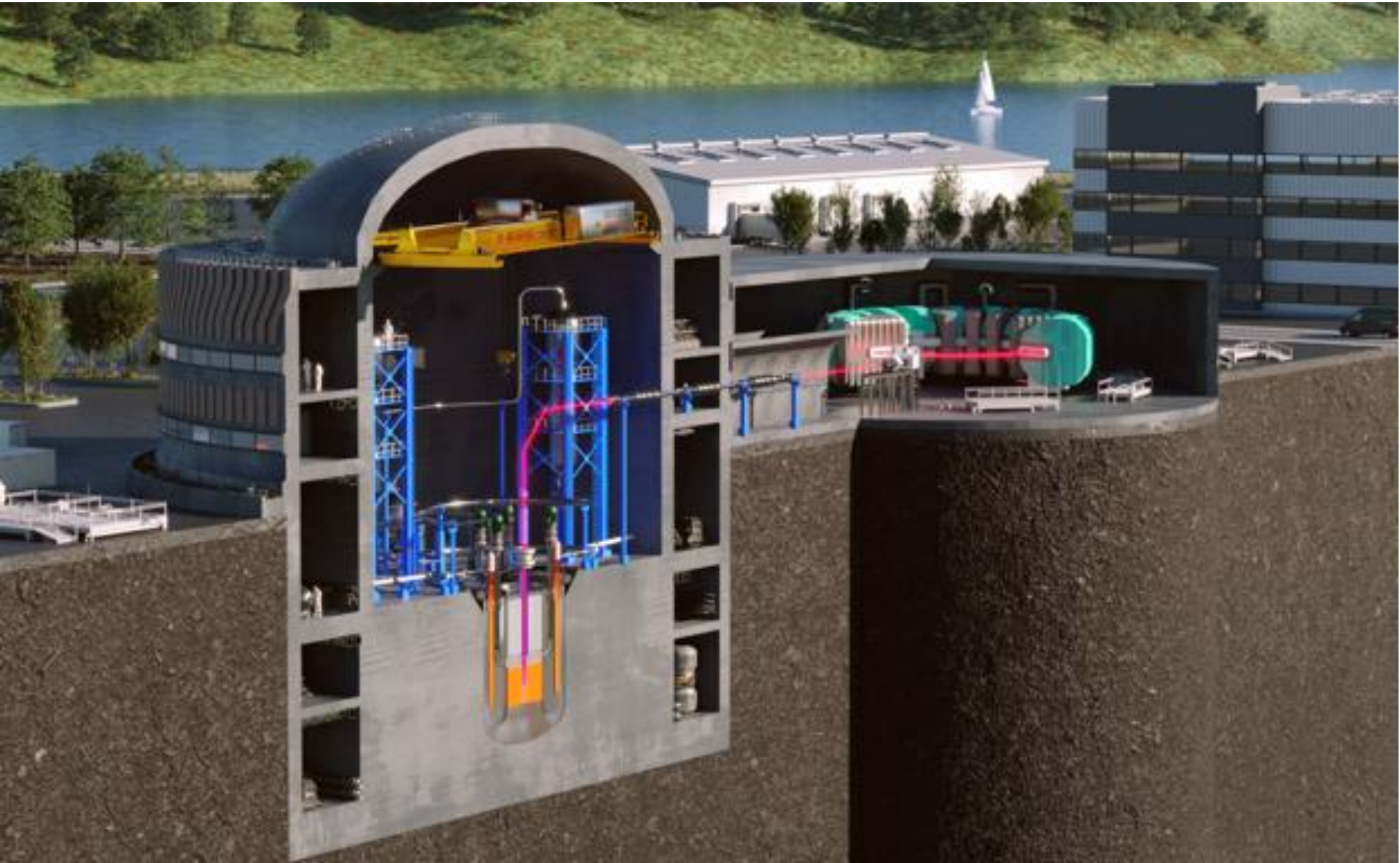
Freeze plug

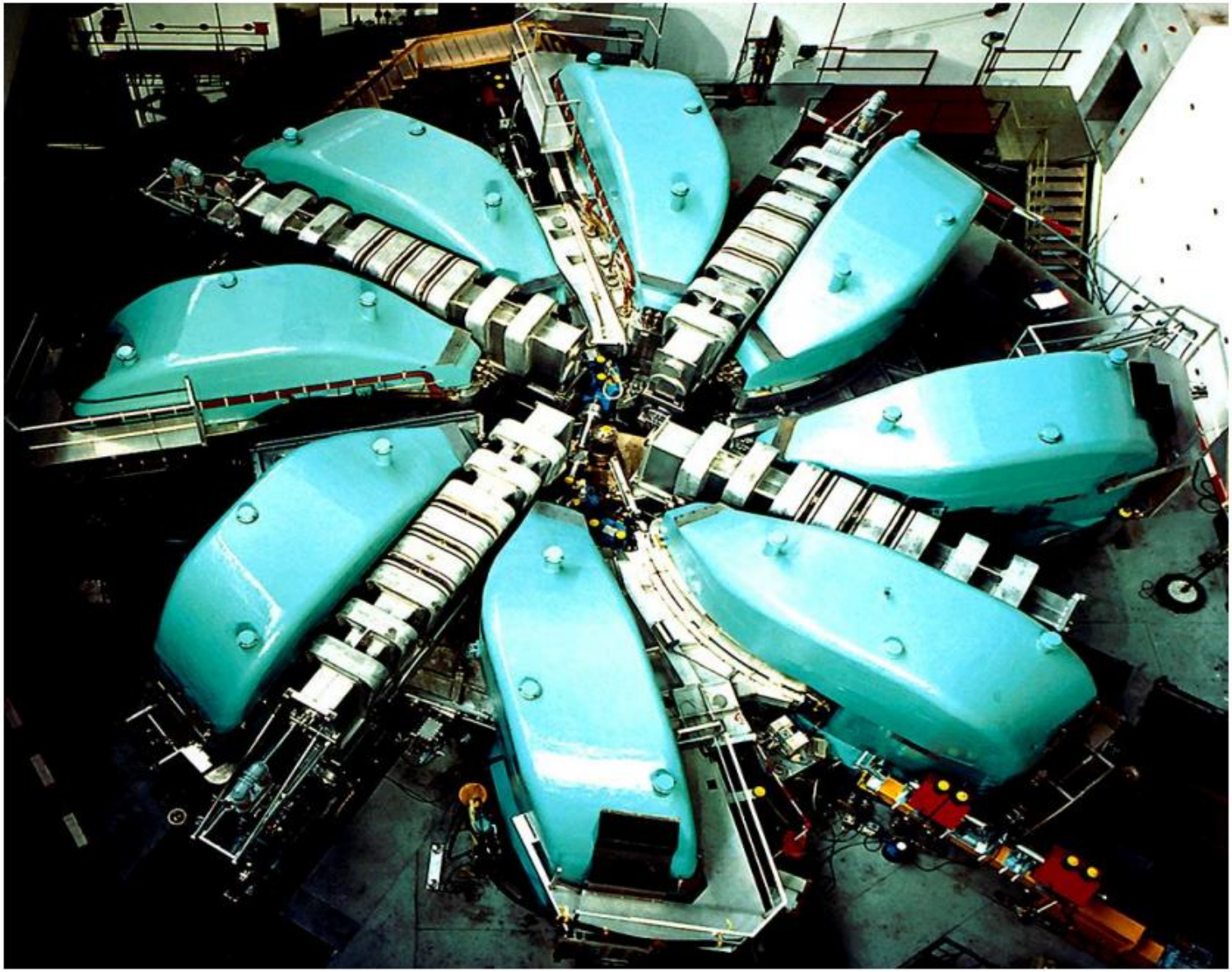
A plug made of frozen salt that is cooled by electric fans is crucial to the MSR's "walk-away safe" system. If power is lost, the plug melts, and the fuel drains from the reactor into drain tanks.

Containment vessel

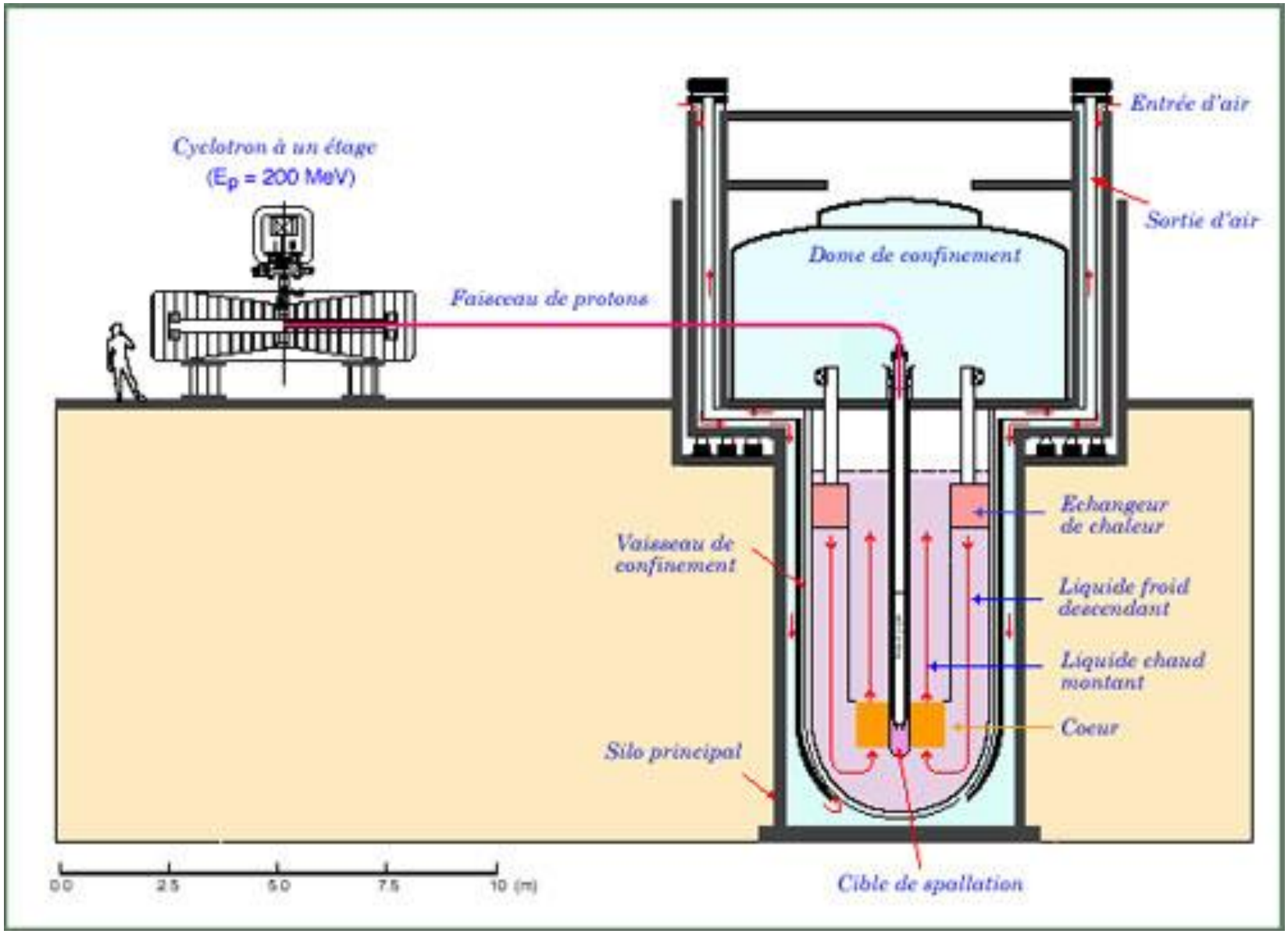
Because an MSR's liquid fuel isn't under pressure, there is little risk of an explosion and no need for a large containment vessel. In the event of a shell and reactor breach, any spill would be localized and wouldn't threaten nearby populations.

ADS – Accelerator-driven system





Principe de l'Accelerator-Driven System (ADS)



NEXT

MELTDOWN-PROOF NUKES

Water-cooled nuclear power plants aren't the only option.

The next generation of nuclear plants may be cooled by gaseous helium. Such reactors were proposed in the 1960s but rarely pursued; only a few have ever been built. But that could change. Though issues such as fuel storage are a potential concern, gas reactors—which can't melt down—may be a way forward in the wake of Japan's nuclear disaster.

Using helium as a coolant has at least a couple of advantages. For one thing, it's inert, so it can't become radioactive like the water in water-cooled plants. For another, gas reactors are more efficient at generating electricity than water-cooled ones, because they run much hotter. That heat, produced carbon free, has gotten the attention of chemical, fertilizer, and oil companies. Though it's still in the developmental stage, "this technology could be a real game changer," says Fred Moore of Dow Chemical.

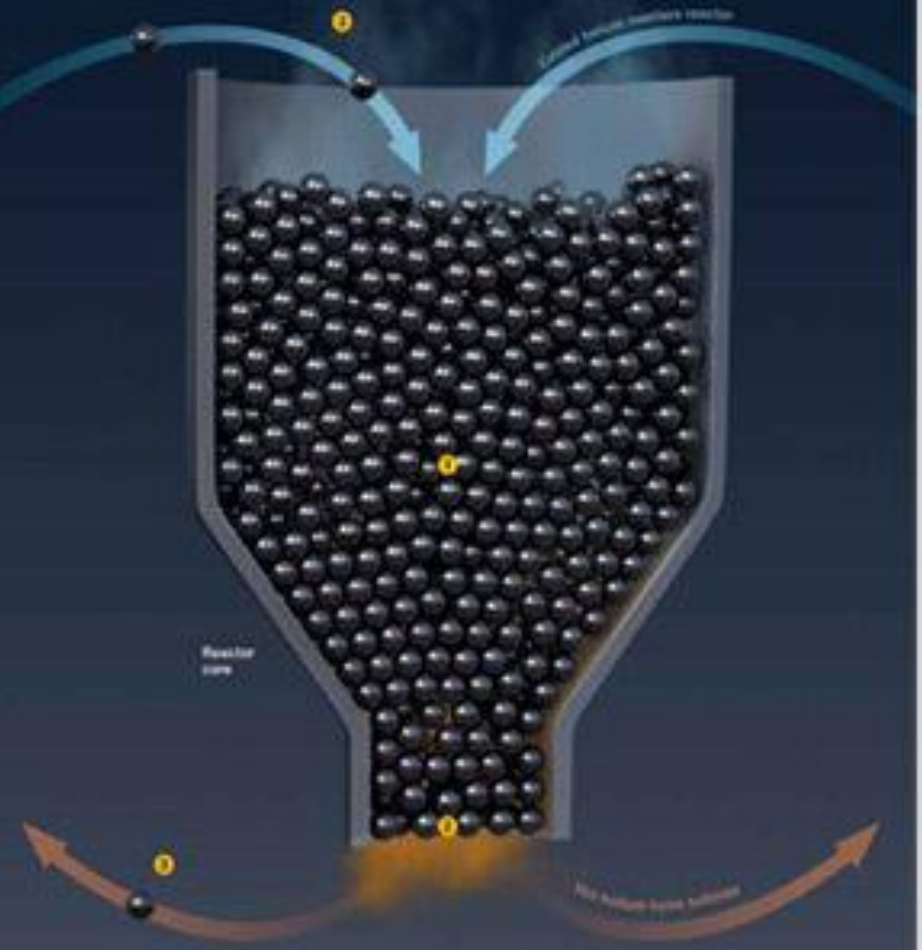
At the core of the reactor's safety is a clever fuel design. Instead of the uranium fuel rods used in water reactors, gas reactor fuel takes the form of uranium bits scattered among graphite "pebbles." Graphite is a great moderator, slowing down the neutrons and keeping their reaction in the proper temperature range.

Andrew Kadak of MIT, who visited a small prototype pebble-bed reactor in China four years ago, watched engineers turn off the cooling system. "It naturally shut down," he says. "It was incredible. Especially in light of Fukushima, this is a reactor that doesn't melt down." —*Jol Bennett*



What's Inside a Pebble?

Each "pebble" in a pebble-bed gas reactor is a graphite fuel sphere the size of a tennis ball, holding grains of uranium oxide dispersed among some 15,000 tiny particles within the graphite. During a recent three-year test of Idaho National Lab, 300,000 fuel particles were heated to 2300°F and bombarded with neutrons. Not a single particle leaked radioactive material—strong evidence of the fuel's safety.



How It Works

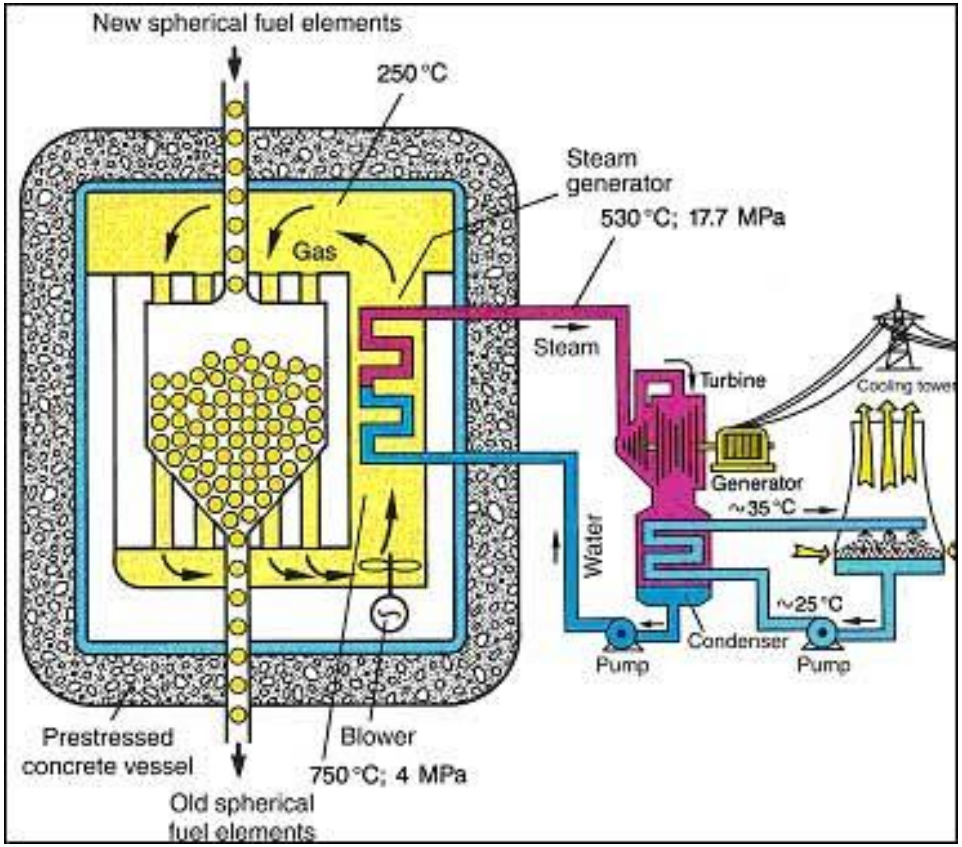
A pebble-bed reactor is made up of about 400,000 pebbles. Heat from the fuel spheres is picked up by helium and can then be used to generate electricity—or to drive industrial processes such as oil refining and desalination.

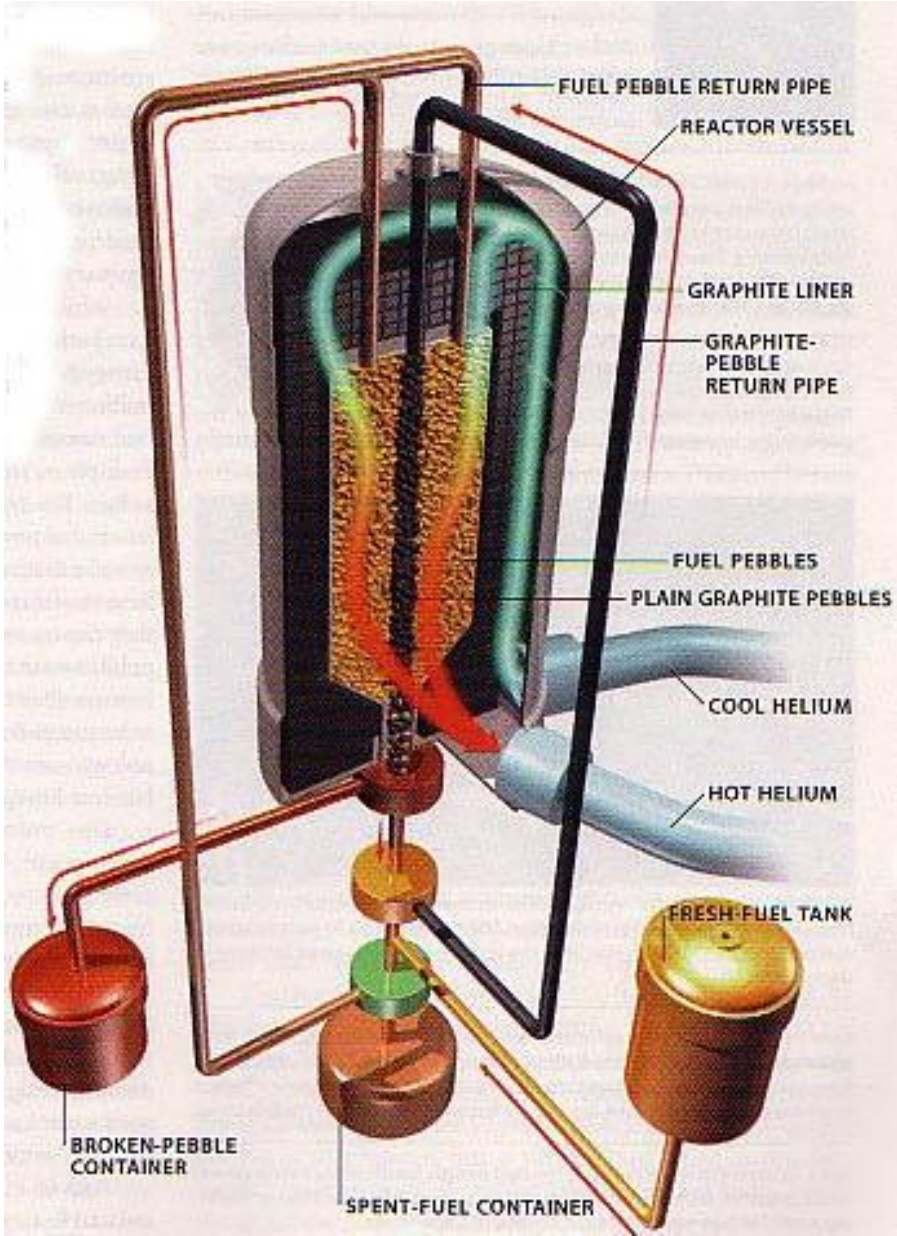
1 Blowers move helium gas through the reactor and over the pebbles, where nuclear fission releases large amounts of energy, heating up the helium.

2 About 1,000 spheres move through the reactor each day, like gum balls through a vending machine. The constant circulation ensures no refueling interruptions.

3 If a pebble taken from the bottom can produce more power, it goes back in the top. If it's spent, it's stored as waste, and a new pebble is added.

Réacteur à lit de boulets





Réacteur à lit de boulets

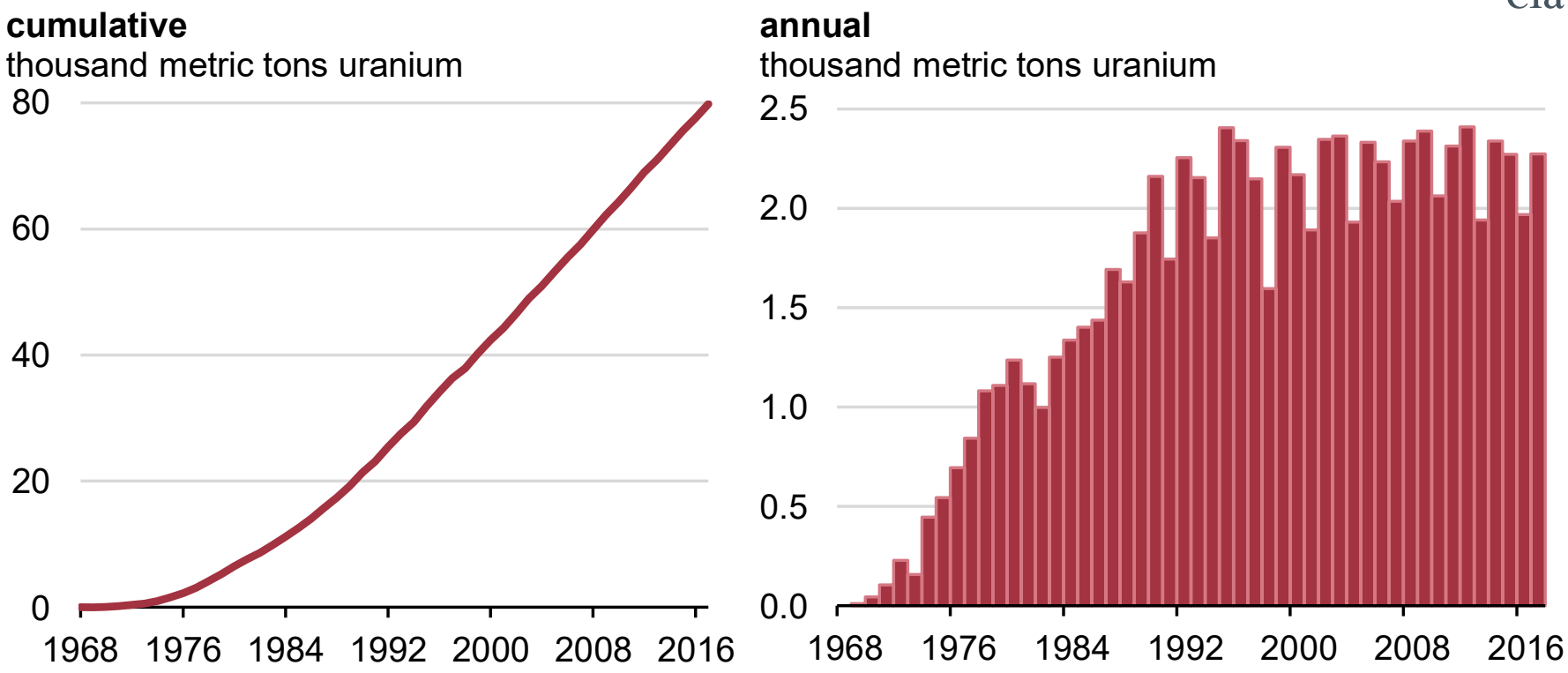




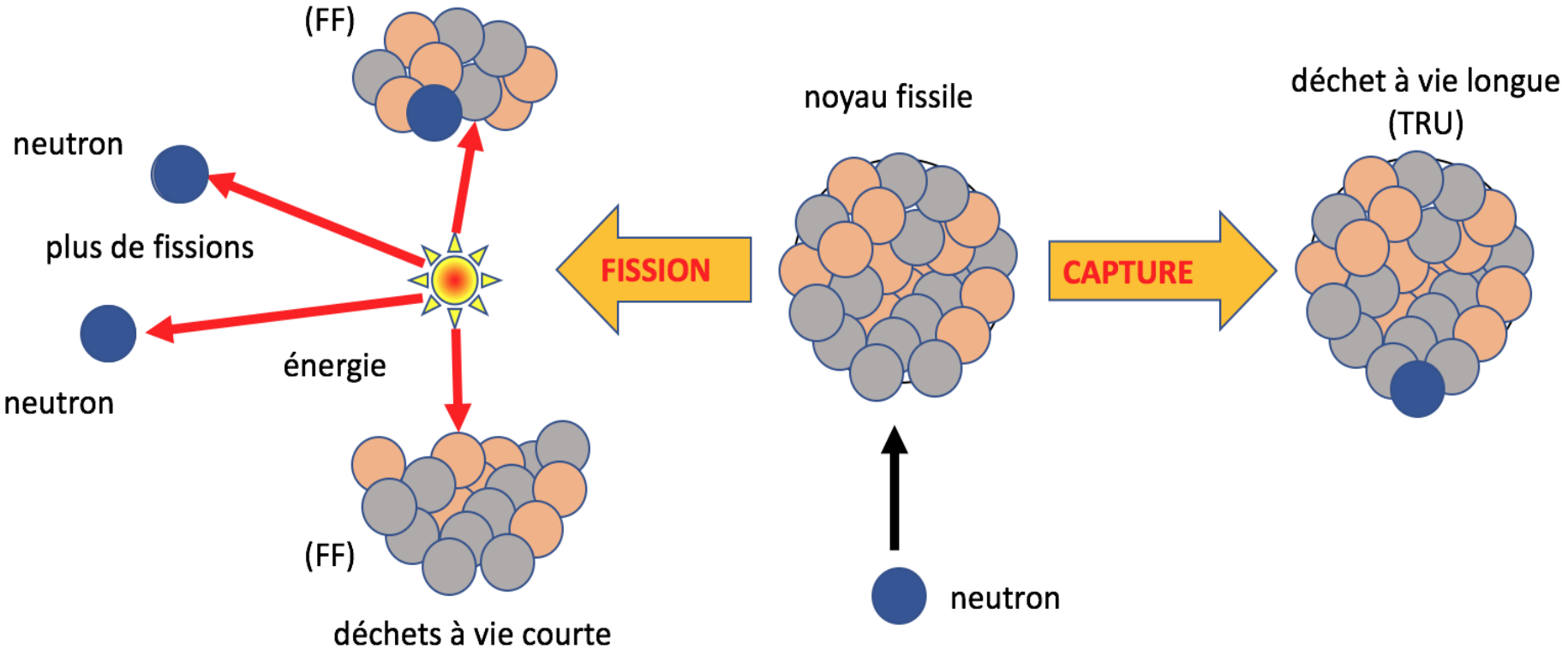
- Contexte et Gen IV
- Le Thorium
- Cycle du thorium
- Les types de réacteurs
- **Les déchets / retraitement**
- Transmutation
- Prolifération
- Coûts
- Perspectives

Déchets nucléaires

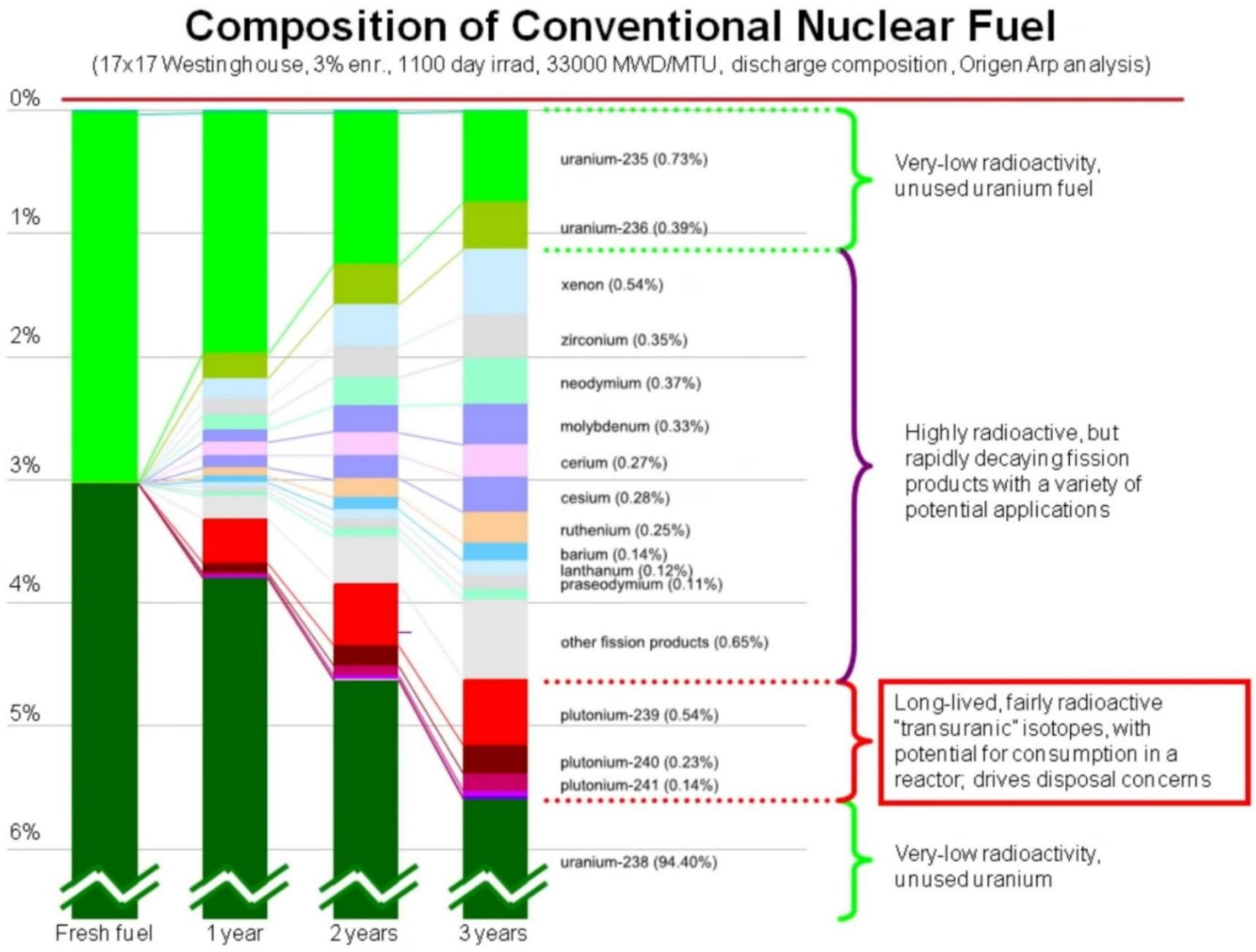
Spent nuclear fuel discharged and stored at U.S. commercial nuclear reactors (1968–2017)

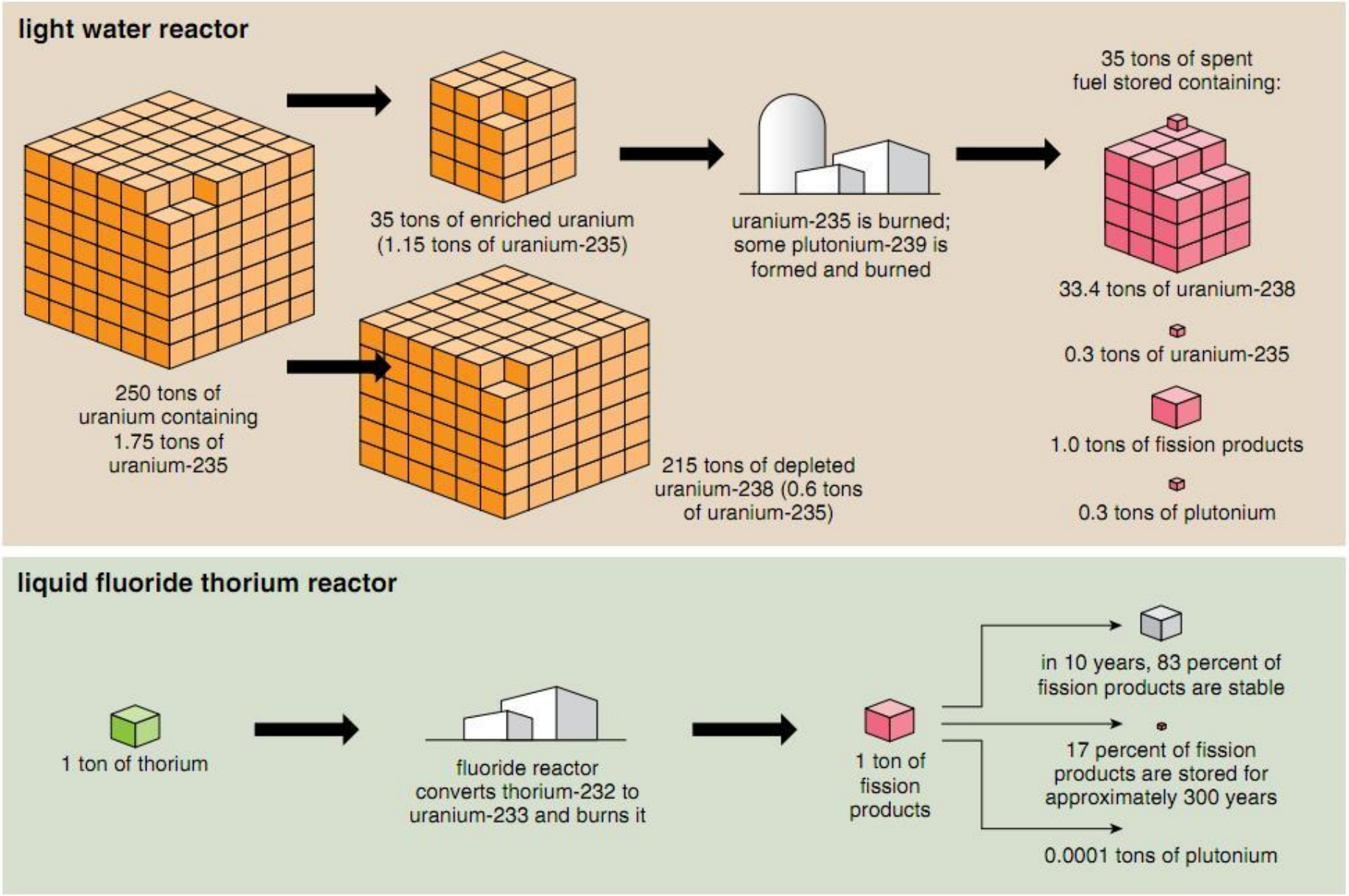


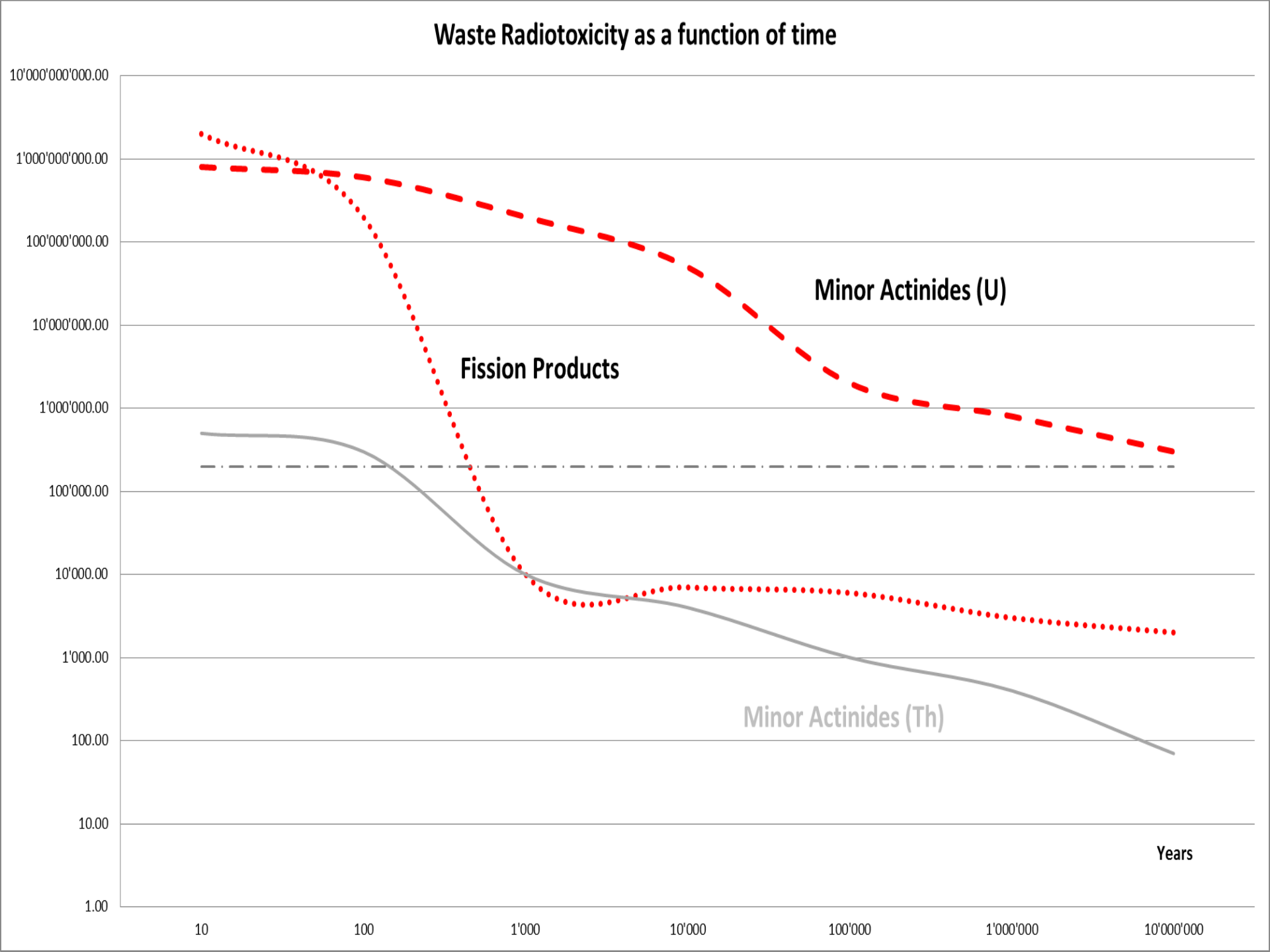
Déchets nucléaires

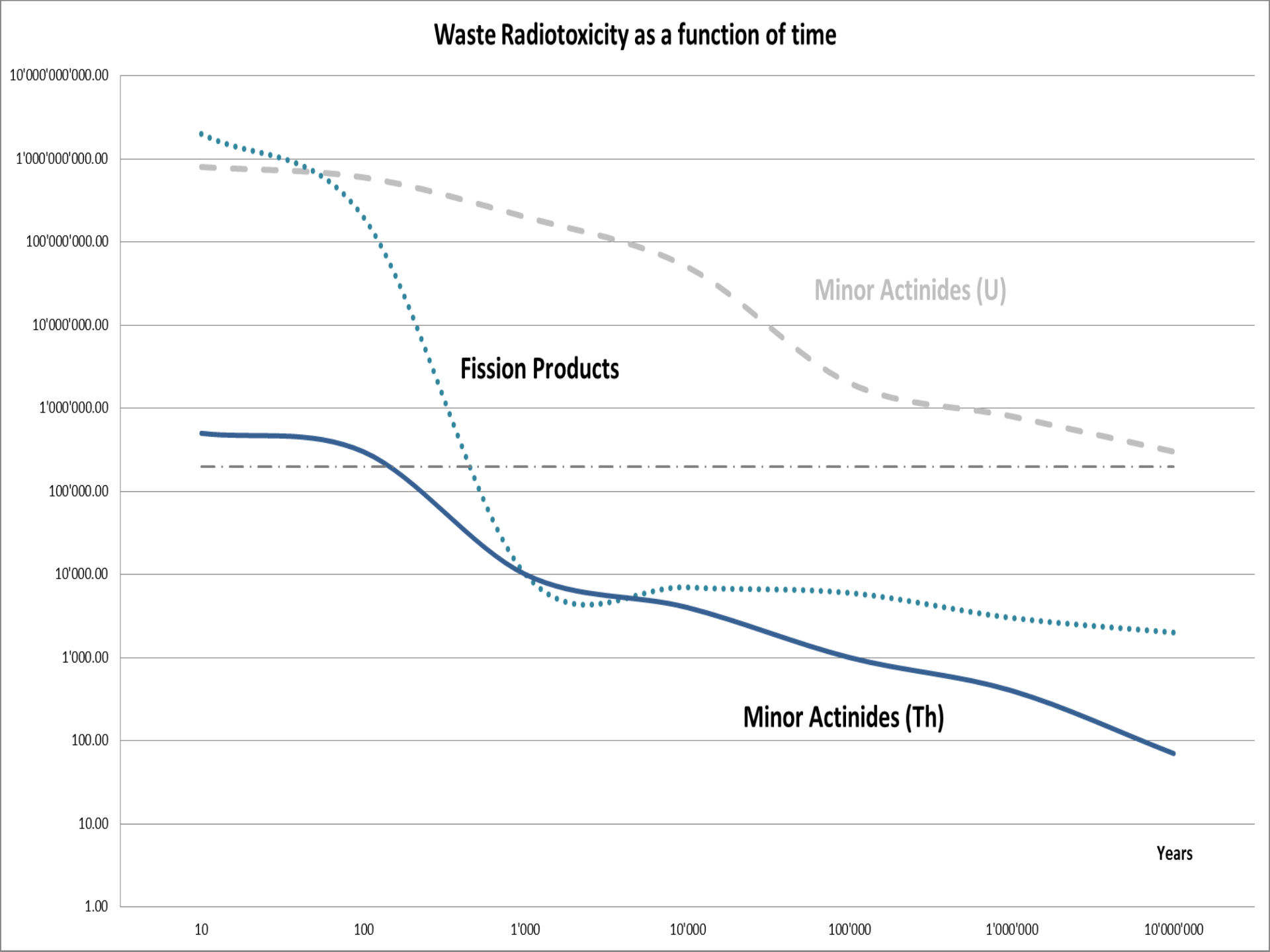


Combustible



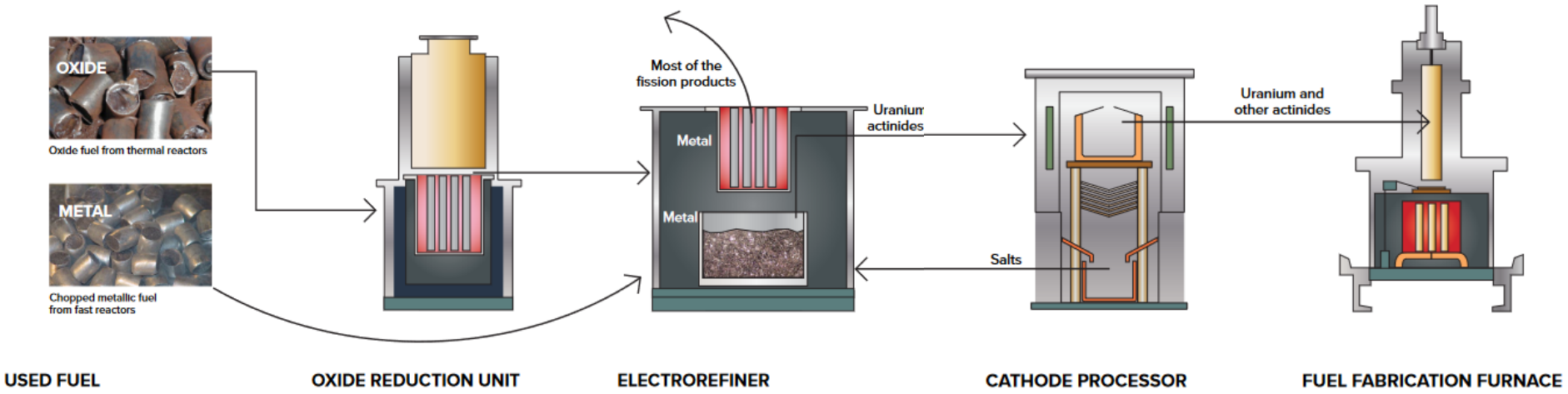

light water reactor
250 tons of uranium containing 1.75 tons of uranium-235
35 tons of enriched uranium (1.15 tons of uranium-235)
215 tons of depleted uranium-238 (0.6 tons of uranium-235)
uranium-235 is burned; some plutonium-239 is formed and burned
35 tons of spent fuel stored containing:
33.4 tons of uranium-238
0.3 tons of uranium-235
1.0 tons of fission products
0.3 tons of plutonium
liquid fluoride thorium reactor
1 ton of thorium
fluoride reactor converts thorium-232 to uranium-233 and burns it
1 ton of fission products
in 10 years, 83 percent of fission products are stable
17 percent of fission products are stored for approximately 300 years
0.0001 tons of plutonium


Waste Radiotoxicity as a function of time
10'000'000'000.00
1'000'000'000.00
100'000'000.00
10'000'000.00
1'000'000.00
100'000.00
10'000.00
1'000.00
100.00
10.00
1.00
Minor Actinides (U)
Fission Products
Minor Actinides (Th)
Years
10
100
1'000
10'000
100'000
1'000'000
10'000'000


Waste Radiotoxicity as a function of time
10'000'000'000.00
1'000'000'000.00
100'000'000.00
10'000'000.00
1'000'000.00
100'000.00
10'000.00
1'000.00
100.00
10.00
1.00
Minor Actinides (U)
Fission Products
Minor Actinides (Th)
Years
10
100
1'000
10'000
100'000
1'000'000
10'000'000


vices!
ht zu Ihrer
keiten.
verlangen.
ere to assist
its use.
r help.
LA DIRECTION
HEY!
EINE PET-FLASCHE ÜBERLEBT IN DEN BERGEN MEHR ALS 500 JAHRE!
#EnjoyAndRespect
Mit Unterstützung der Österreichischen Bundesforste
summit FOUNDATION ECOLOGICAL SOLUTIONS

Pyroprocessing



Pyroprocessing





Photos: Argonne National Laboratory

- Contexte et Gen IV
- Le Thorium
- Cycle du thorium
- Les types de réacteurs
- Les déchets / retraitement
- **Transmutation**
- Prolifération
- Coûts
- 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)

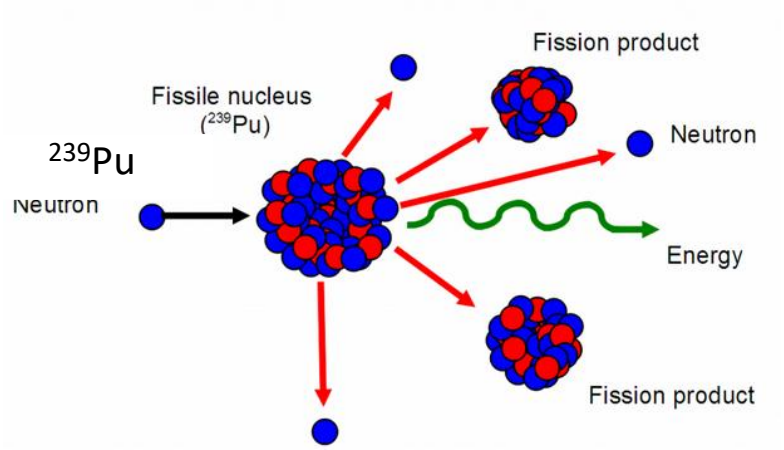
Les actinides mineurs (MA: Np, Am, Cm)

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

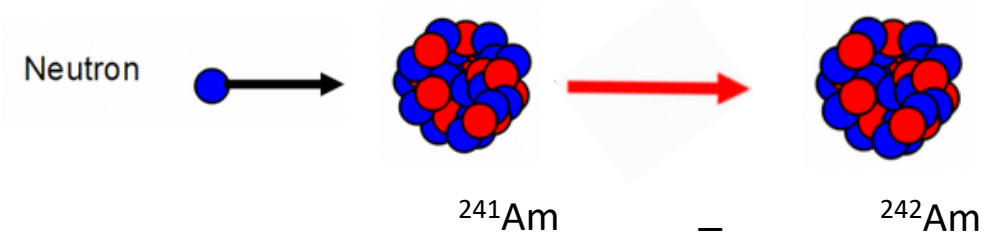
En éléments stables ou à courte durée de vie (< 30 ans), principalement des noyaux légers.

DESTRUCTION DES DECHETS NUCLÉAIRES

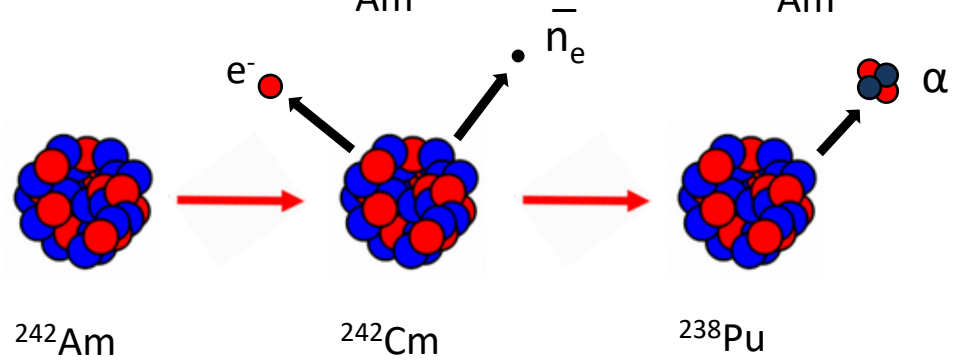
Fission



Capture

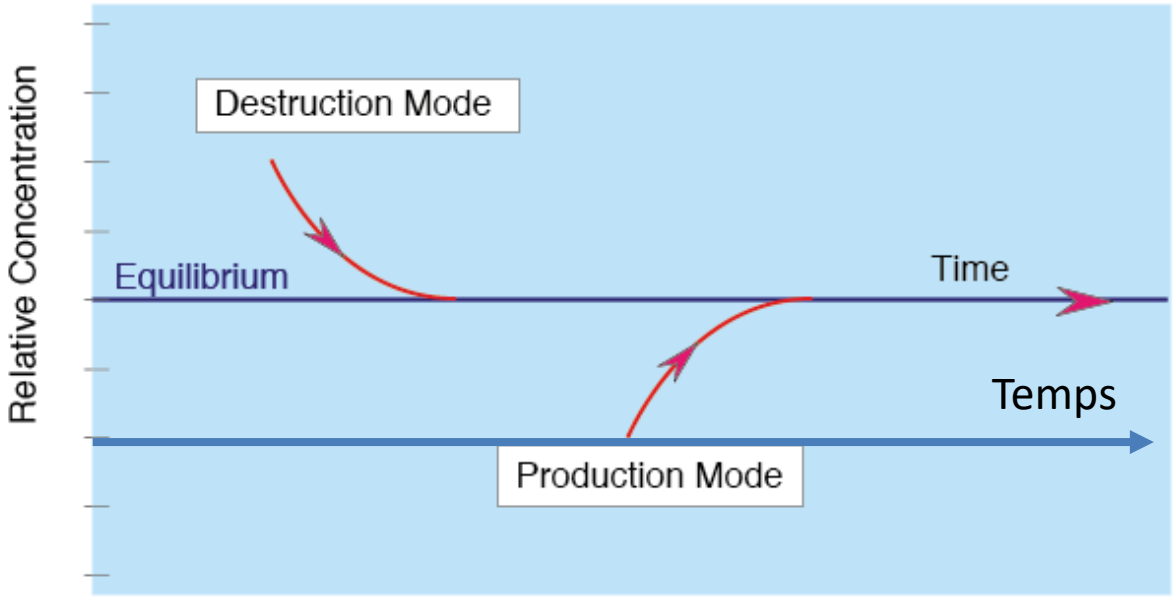


désintégration β, α



Le principe de la transmutation des déchets

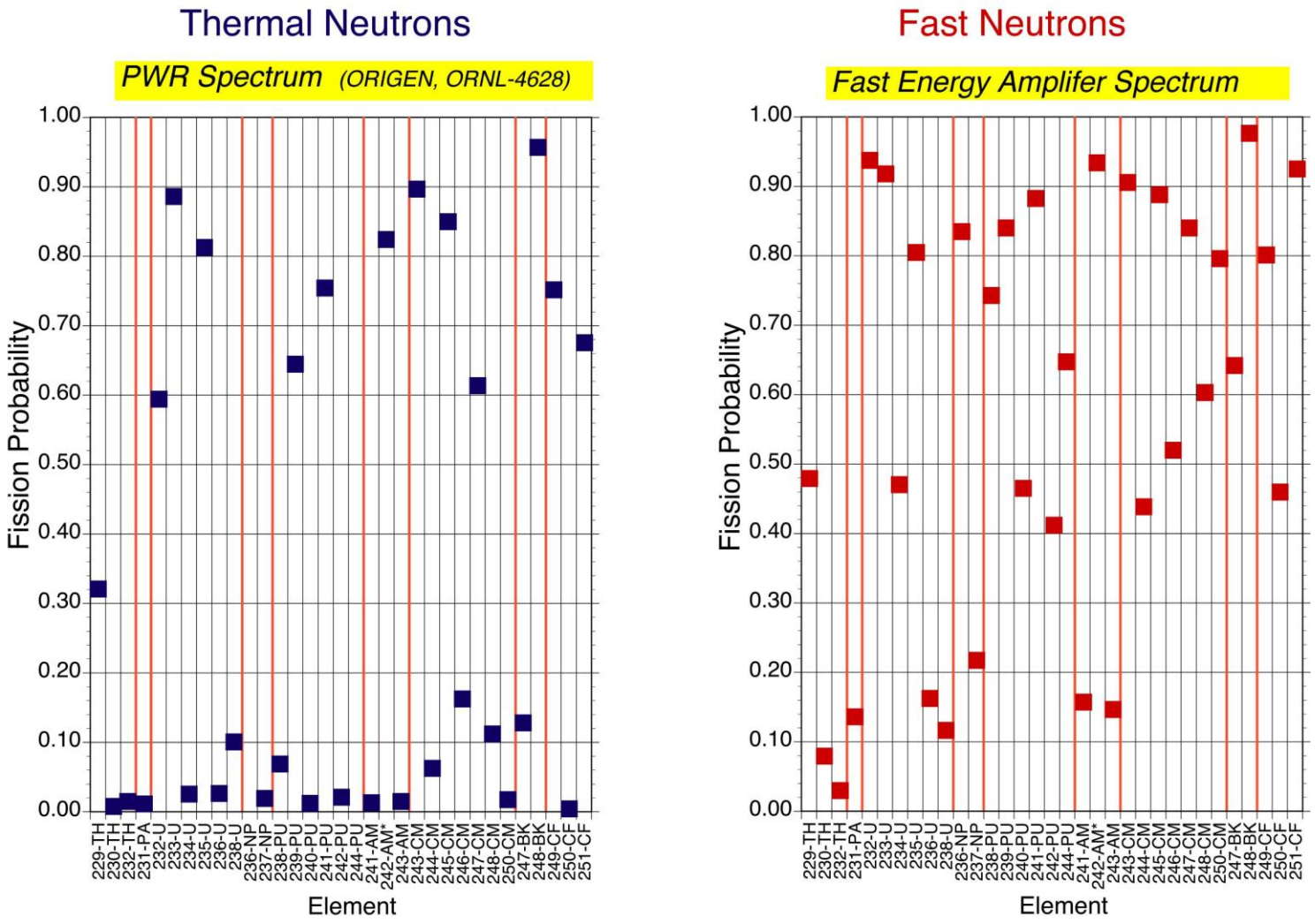
- Il faut non seulement éliminer les éléments transuraniens par fission mais aussi s'assurer qu'en le faisant on n'en produit pas de nouveaux en plus grande quantité



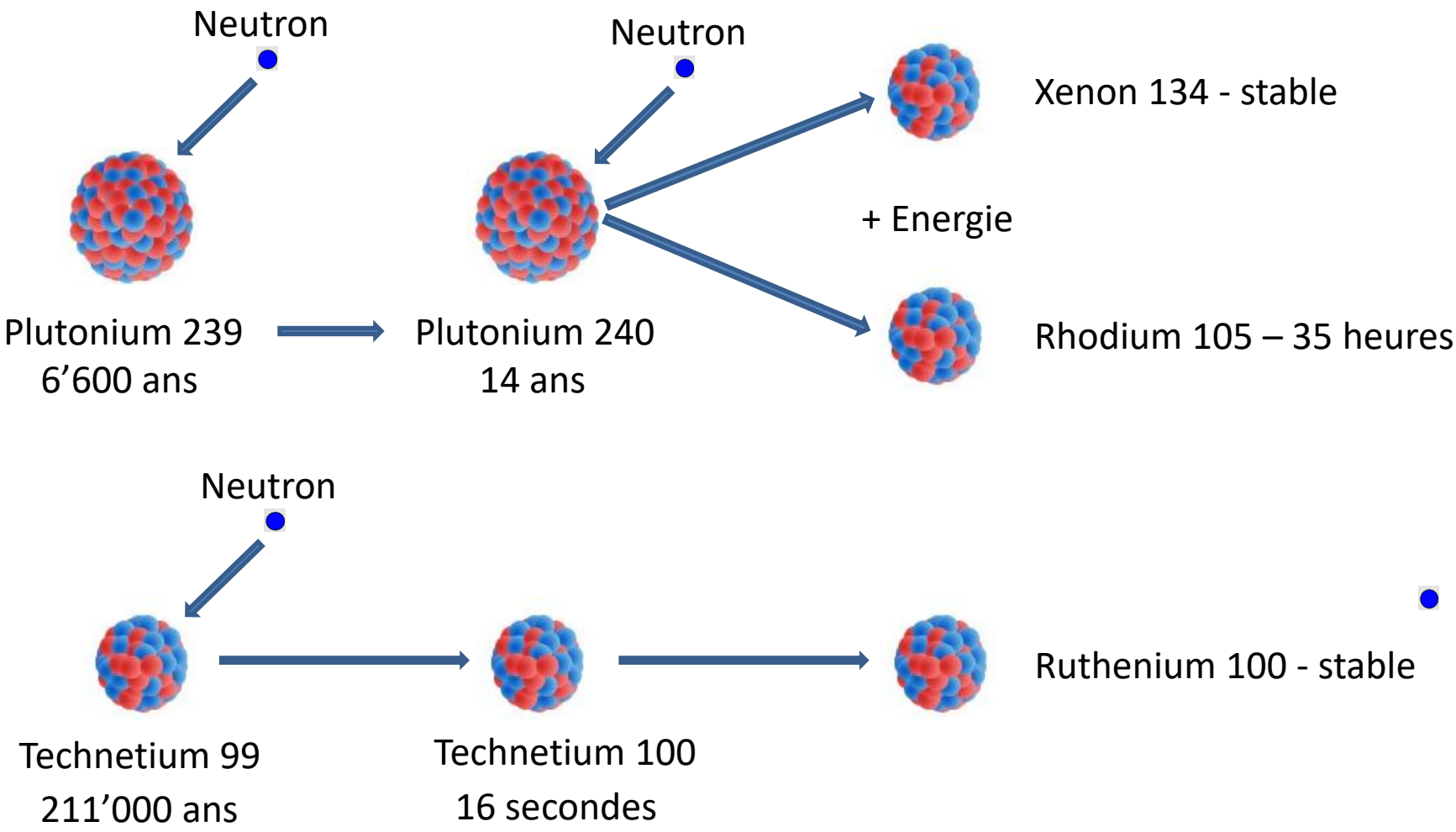
Un élément est produit ou détruit selon sa concentration initiale

Système	Concentration à l'équilibre
U-Pu	15%
Th-Pu	$\leq 10^{-4}$
Th-Act. Min.	$\leq 10^{-5}$

Pourquoi des neutrons rapides ?



Destruction des déchets nucléaires



Destruction des déchets nucléaires: une optimisation du dépôt géologique



LoTi lädt ein zum Vortrag und anschliessender Diskussion mit Dr. Franz Strohmer, Leiter Brennstoff und Wiederaufarbeitung, Transmutex SA

Transmutation als Chance für die Entsorgung radioaktiver Abfälle

Im dreiteiligen Vortrag erklärt uns Dr. Franz Strohmer Schritt für Schritt:

I. Die Prozesse, die erforderlich sind, um aus Uranerz einen Brennstab herzustellen, wie daraus im Kernkraftwerk Energie erzeugt wird und was mit ausgedienten Brennstäben passiert;

II. Der Recyclingvorschlag der Transmutex für ausgediente Brennstäbe, um diese weiterzuverwenden und Menge und Langlebigkeit des radioaktiven Abfalls schlussendlich stark zu verringern;

III. Die Chancen, Herausforderungen, Auswirkungen und Risiken dieses Recyclingvorschlags in Bezug auf das geplante Endlager für radioaktive Abfälle aufzuzeigen.

Mittwoch, 22.05.2024, um 19.45 Uhr (Dauer ca. 2 Std.)
Neuwis Huus Stadel, Hinterdorfstr. 55, 8174 Stadel

Die Teilnahme an der Veranstaltung ist kostenlos. Es braucht keine Vorkenntnisse, um diesem Vortrag folgen zu können. Der Abend richtet sich an alle Personen, die einen Einblick in die Thematik erhalten möchten. Wir freuen uns über zahlreiches Erscheinen und eine angeregte Diskussion.

Die Firma Transmutex SA arbeitet an einer Technologie weiter, die vor 30 Jahren am CERN entwickelt wurde. Radioaktive Elemente werden in ungefährlichere Elemente umgewandelt; ein Prozess, der als "Transmutation" bezeichnet wird. Während dieser Umwandlung kann zudem Energie gewonnen werden. Als Ausgangsmaterial können ausgediente Brennstäbe verwendet werden. Eine bestechende Idee, anstatt die strahlenden Abfälle für immer tief im Erdreich zu vergraben.

Der Verein LoTi (Nördlich Lägern ohne Tiefenlager) setzt sich gegen die Errichtung eines Endlagers für radioaktive Abfälle ein, wie es derzeit gemäss den gesetzlichen Vorgaben in der Schweiz vorgesehen ist.

Das Ziel des Vereins besteht darin, ein Umdenken und Neudenken hinsichtlich des Umgangs mit radioaktiven Abfällen anzustossen, um eine langfristig sichere, umwelt- und sozialverträgliche Lösung für diese Abfälle zu finden.

LoTi
Nördlich Lägern ohne Tiefenlager
www.loti2010.ch

- Contexte et Gen IV
- Le Thorium
- Cycle du thorium
- Les types de réacteurs
- Les déchets / retraitement
- Transmutation
- **Prolifération**
- Coûts
- Perspectives

Résistance à la prolifération

- Très faible quantité de Pu
- U233 peut être dénaturé avec de l'U238
- Pyroprocessing: le Th toujours présent aux électrodes U233 et Actinides
- Présence d'U232 dans le combustible amène à la production de Tl208, émetteur gamma intense.

- Contexte et Gen IV
- Le Thorium
- Cycle du thorium
- Les types de réacteurs
- Les déchets / retraitement
- Transmutation
- Prolifération
- **Coûts**
- Perspectives

- Contexte et Gen IV
- Le Thorium
- Cycle du thorium
- Les types de réacteurs
- Les déchets / retraitement
- Transmutation
- Prolifération
- Coûts
- **Perspectives**

300 MW - India

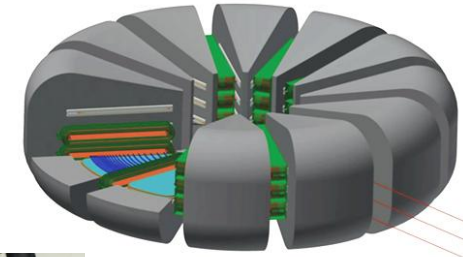


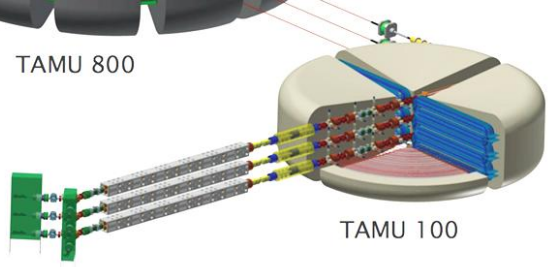


Réacteur à lit de boulets

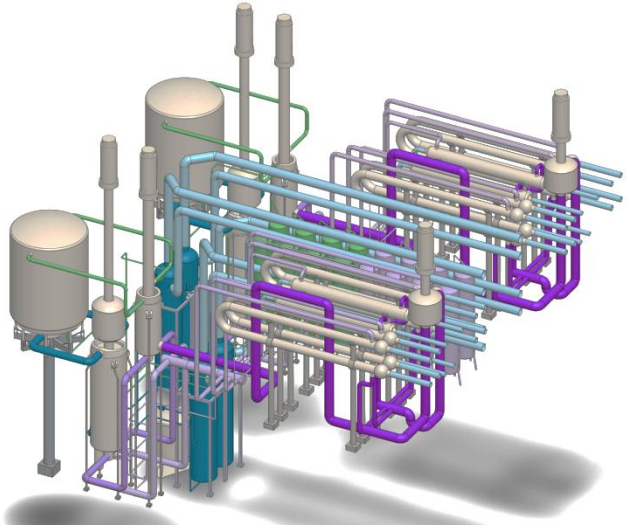


La Chine intéressée aux sels fondus pour la chaleur industrielle, hydrogène; démonstrateur de **15 MW en 2025**

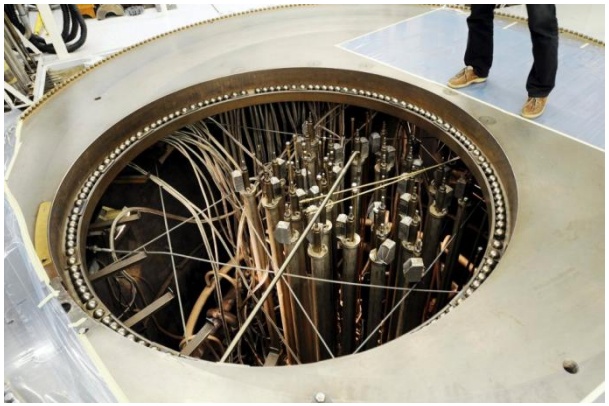




Cyclotron:
2 – étapes, triple source superconducting



Flibe Energy, **USA**, TMSR



Test à Halden

Recherches sur l'**ADS world-wide**: Europe (Myrrha) Japon, Indie, Chine, Corée du Sud, Russie, UK,…

Le projet d'ADS européen : MYRRHA

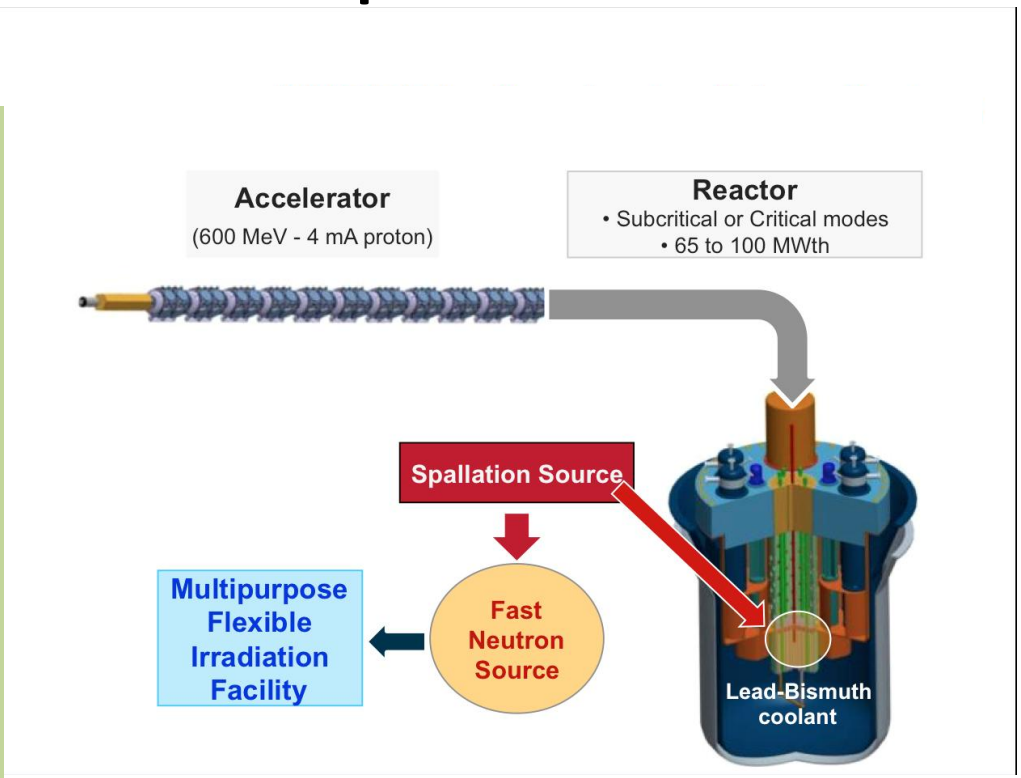
Le concept le plus développé dans le monde est MYRRHA qui devrait être le porte drapeau des projets ADS, mais :

– seulement partiellement financé* (injecteur ≤ 100 MeV)

– pas avant 2030, probablement beaucoup plus tard ?

– pas de thorium dans les plans

– ne restera pas un ADS, sera transformé en réacteur critique

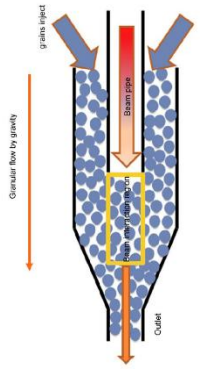


Hamid Aït Abderrahim
SCK•CEN, Boeretang 200, 2400 Mol, Belgium

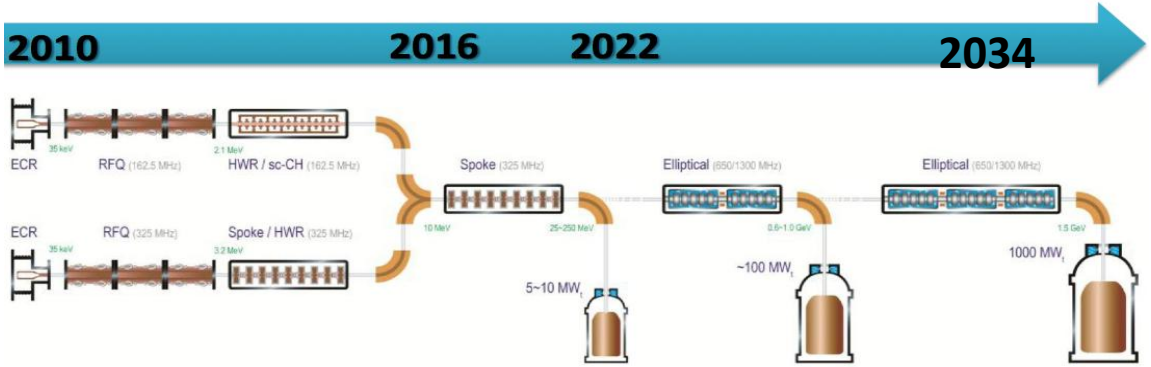
*L'Europe a dépensé 600 milliards d'Euros pour les énergies renouvelables (solaire et éolien), de 2005 à 2013 (Bloomberg New Energy Finance)

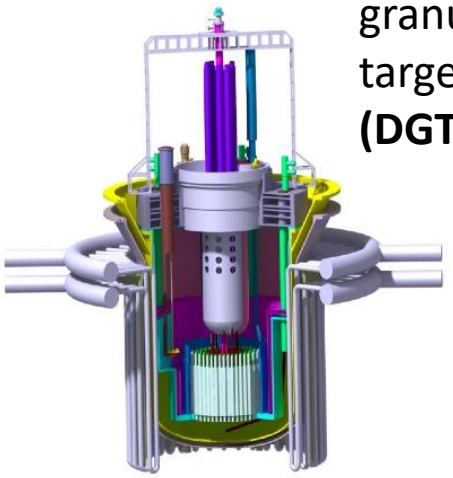
Projet ADS chinois : CiADS

- Accelerator-Driven Advanced Nuclear Energy System (ADANES) dirigé par Wenlong Zhan (CAS), en vue d'un système énergétique complet, intégrant la transmutation des déchets nucléaires et la (sur)génération de combustible nucléaire, **pour une puissance de 1000 MWe**.
- **Le projet inclut un programme de R&D systématique sur tous les éléments du système**.

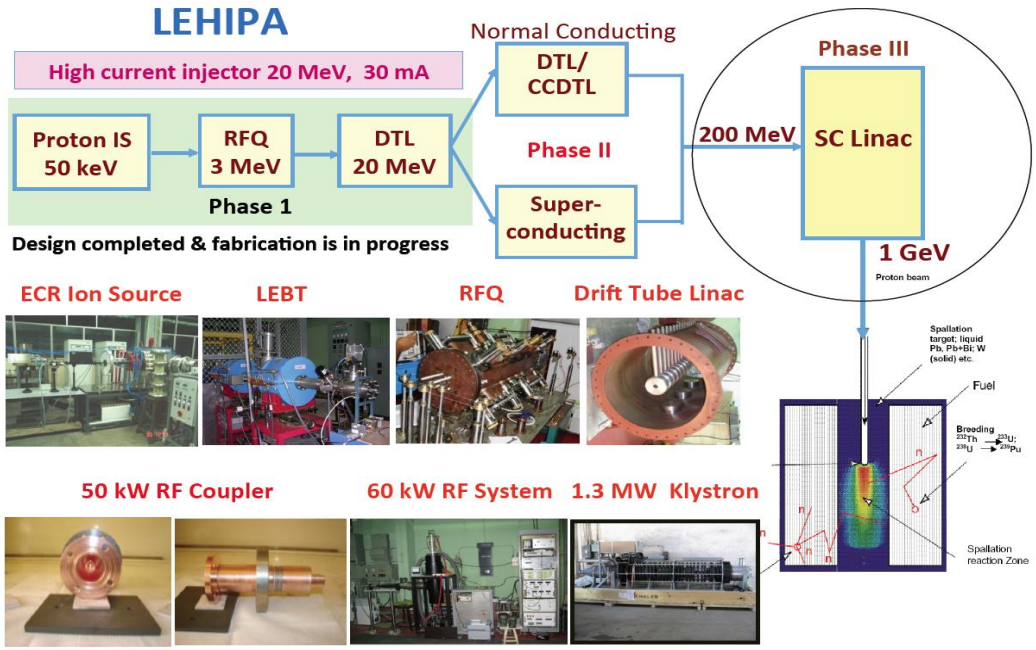


dense granular target **(DGT)**





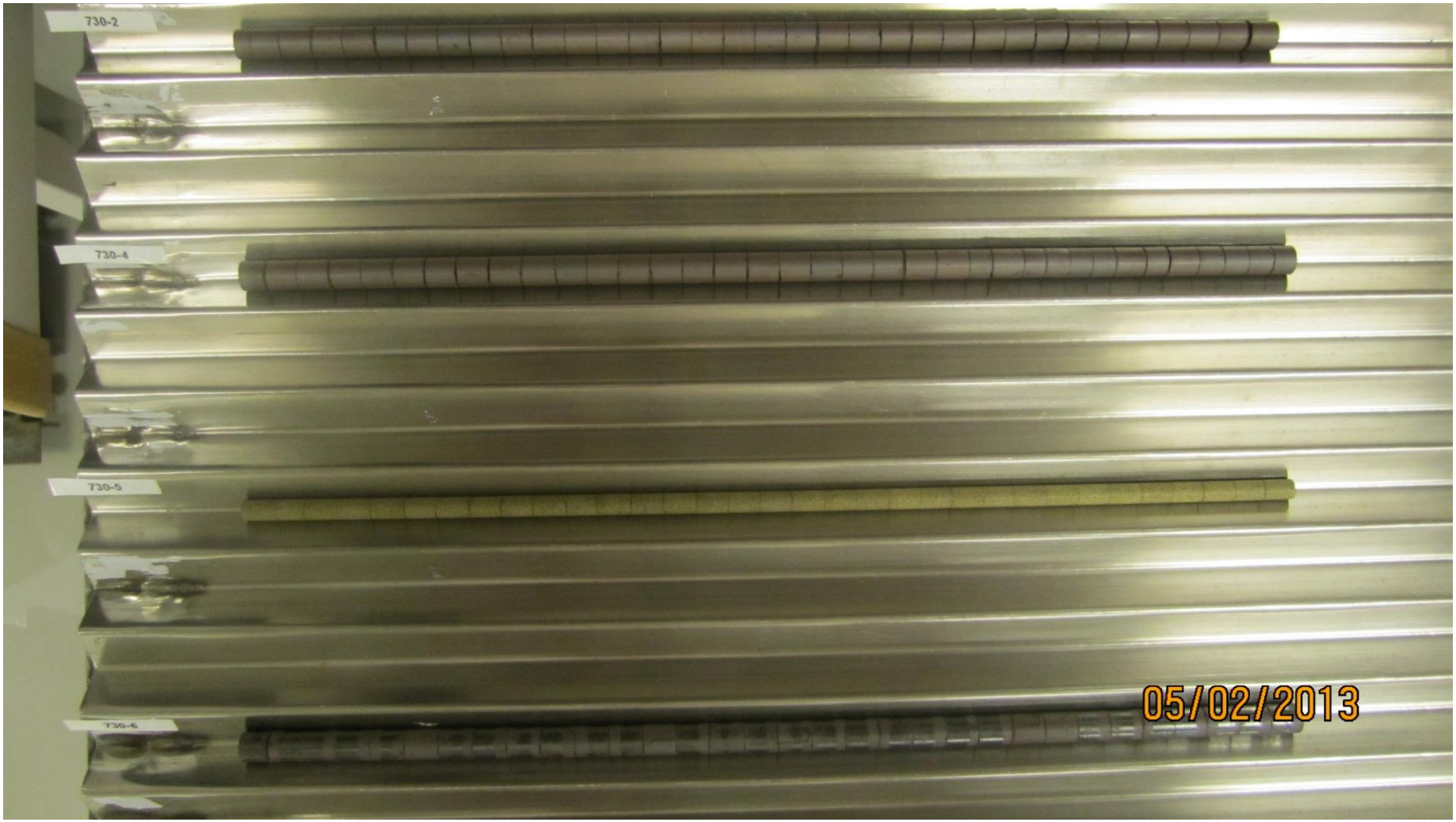
Projet ADS indien



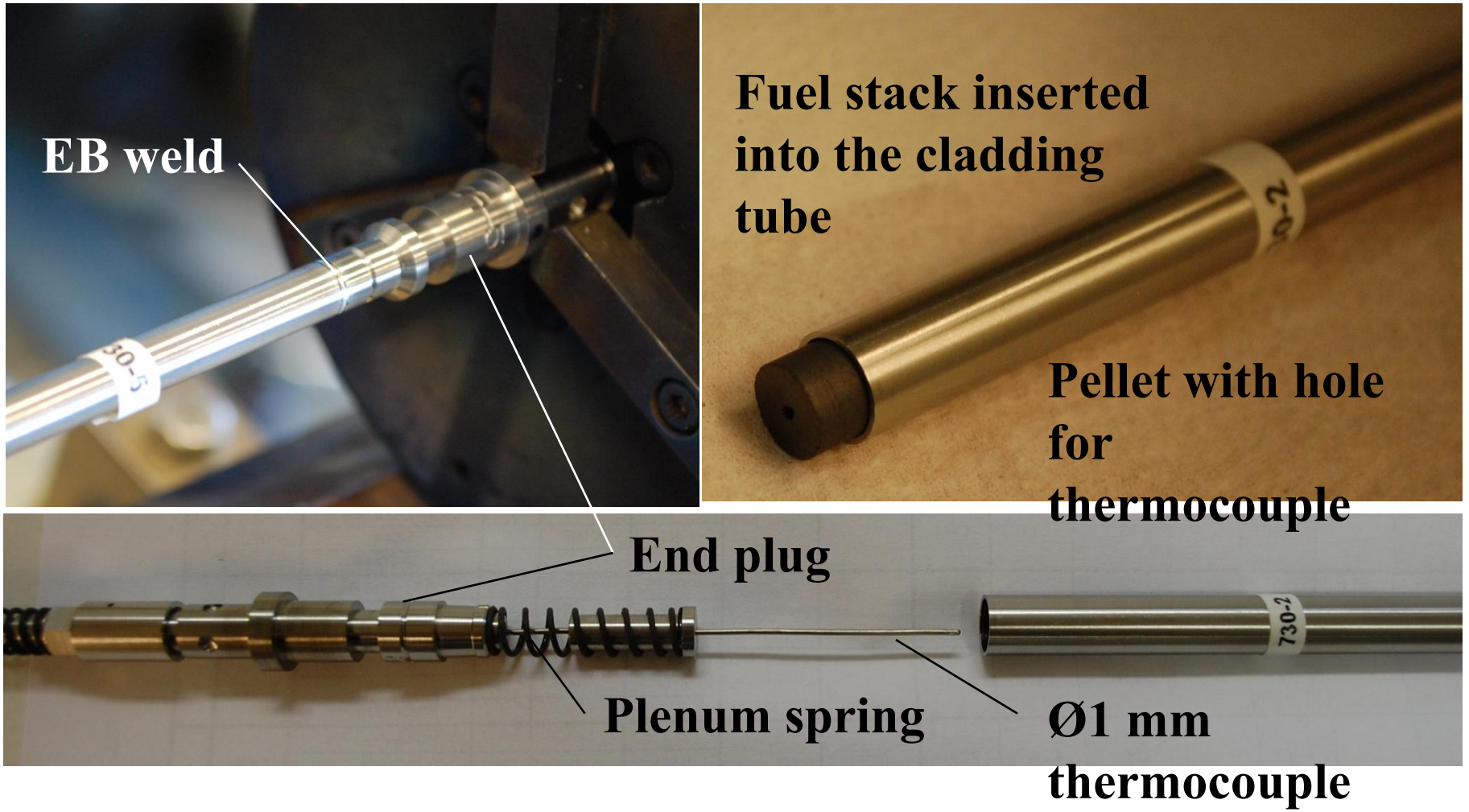
Autres activités ADS R&D dans le monde : Japon, Corée du Sud, Turquie, **Ukraine** (KIPT), UK (Aker Solutions C. Rubbia), Venezuela, Chili, etc.

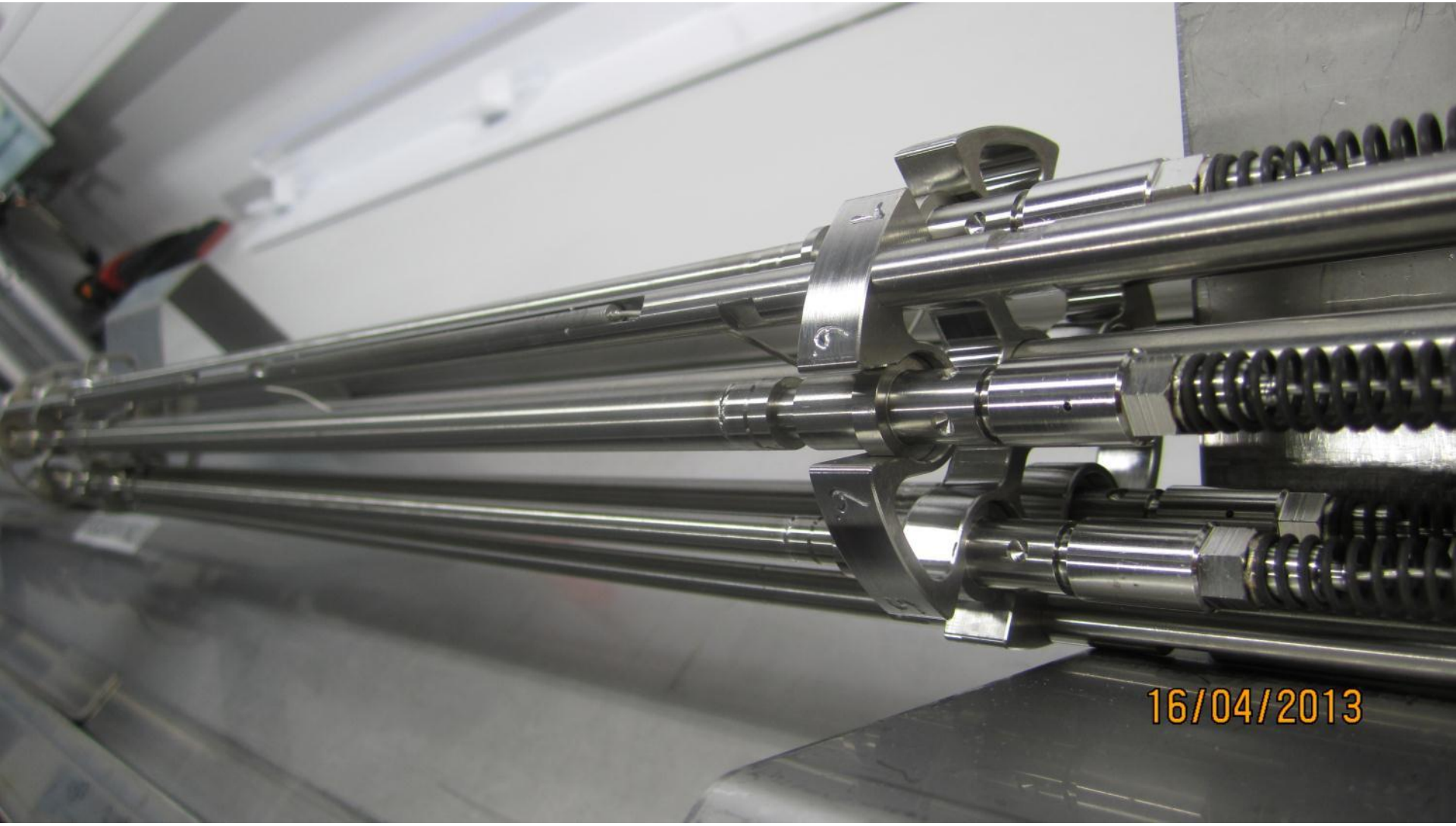
- L'Inde a un plan d'utilisation du thorium basé sur trois types de réacteurs critiques.
- En parallèle, l'Inde étudie un ADS de 200 MWe PHWR piloté par un accélérateur et utilisant du combustible uranium naturel et thorium.
- De plus l'Inde coopère avec les USA sur un projet d'accélérateur de haute puissance **(1 GeV et 30 mA),** (ancien Project X de Fermilab).
  - **Phase 1** : 30 mA, 20 MeV injecteur linac (LEHIPA).
  - **Phase 2** : accélération du faisceau à 1 GeV grâce à un linac supraconducteur

Test de Halden



Halden: IFA-730 crayon-test

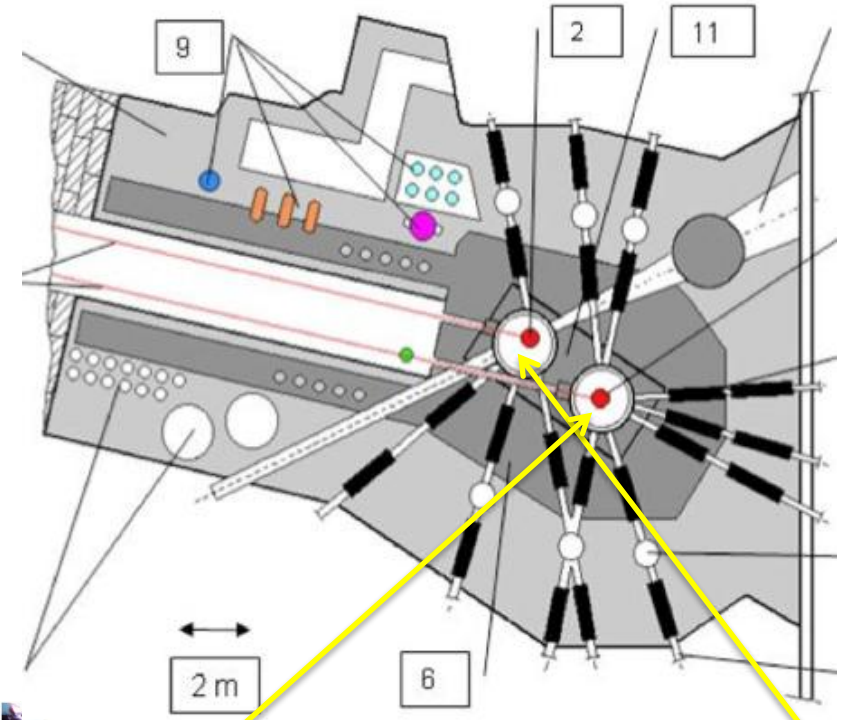



16/04/2013

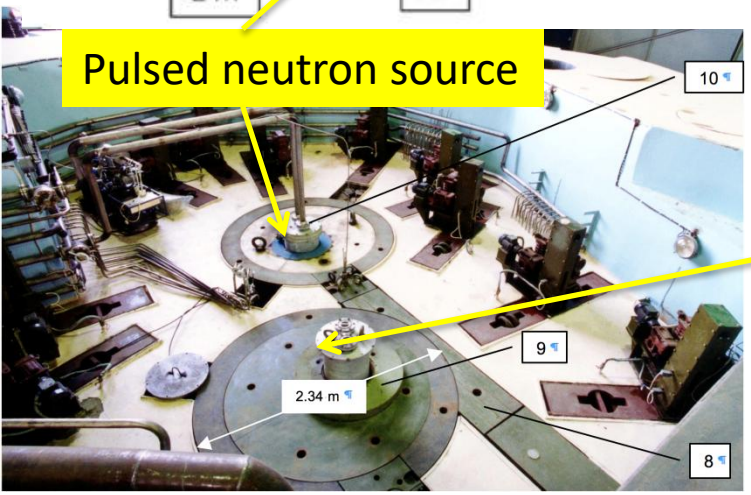


Le LINAC





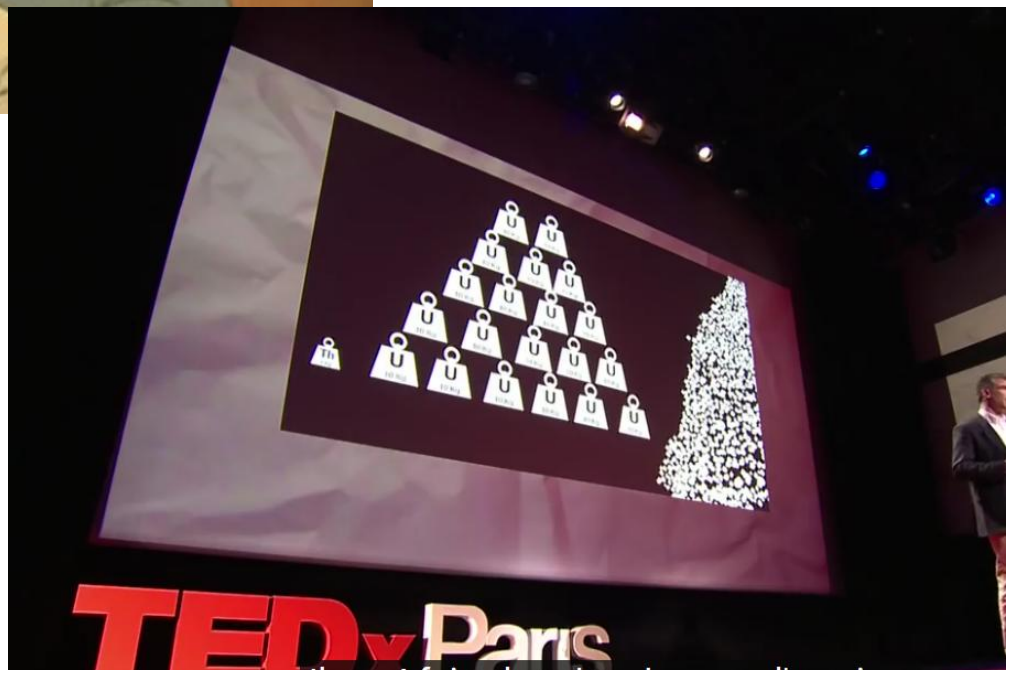




Pulsed neutron source

ADS experimental cell


[THORIUM]
LA FACE CÂCHÉE
DU NUCLÉAIRE


TEDxParis