TRANSMUTEX

Les bienfondés de l’énergie atomique

Maurice Bourquin

Professeur honoraire UNIGE

Conseiller principal Transmutex SA

Adjunct Professor Nelson Mandela African Institution of Science and Technology

27 juin 2025

En ce qui concerne l’énergie, l'électrification est une importante stratégie pour réduire les émissions de gaz à effet de serre

Elle incite à

la modernisation des réseaux électriques

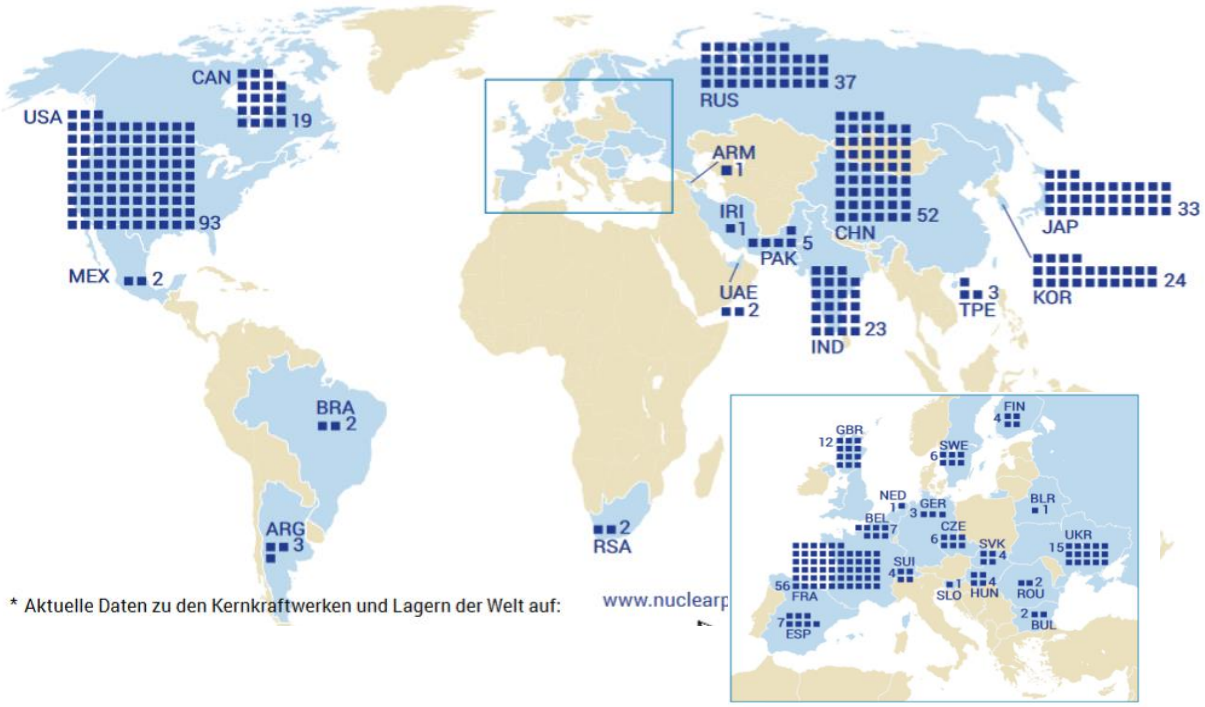
à la mise au point de technologies innovantes qui permettent d'améliorer l'efficacité, le nouveau nucléaire

au développement de nouvelles énergies renouvelables

Structure de la présentation

1. Le développement de l’énergie nucléaire dans le monde
2. Comment sont produits les déchets des centrales nucléaires
3. Le cycle du combustible nucléaire en Suisse
4. La « transmutation » ,nouvelle option pour le traitement des déchets et l'approvisionnement en énergie
5. Une nouvelle ressource non utilisée et largement disponible, le thorium
6. Exemples d'application en Suisse
7. Conclusions pour répondre au thème

Dans de nombreux pays des centrales nucléaires produisent de l'énergie, d'autres sont en construction



437 centrales dans le monde (+57 en construction)

393 000 MW

10% de la production d'électricité

Incroyablement dense

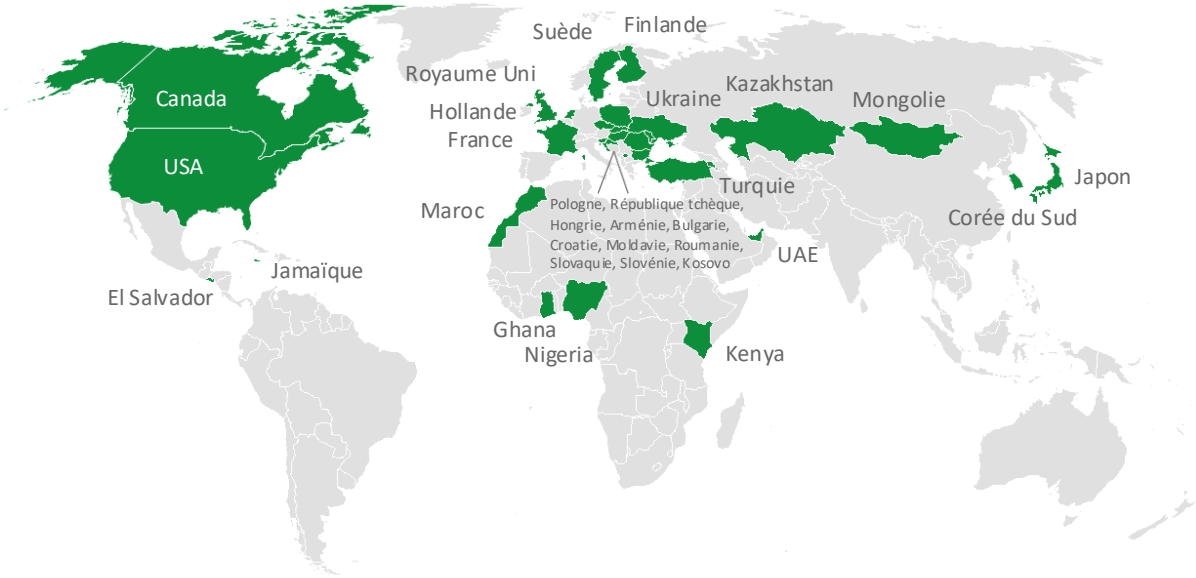
Pour alimenter en électricité une municipalité de 500'000 habitants, il faut :

3.500.000 tonnes de charbon ou

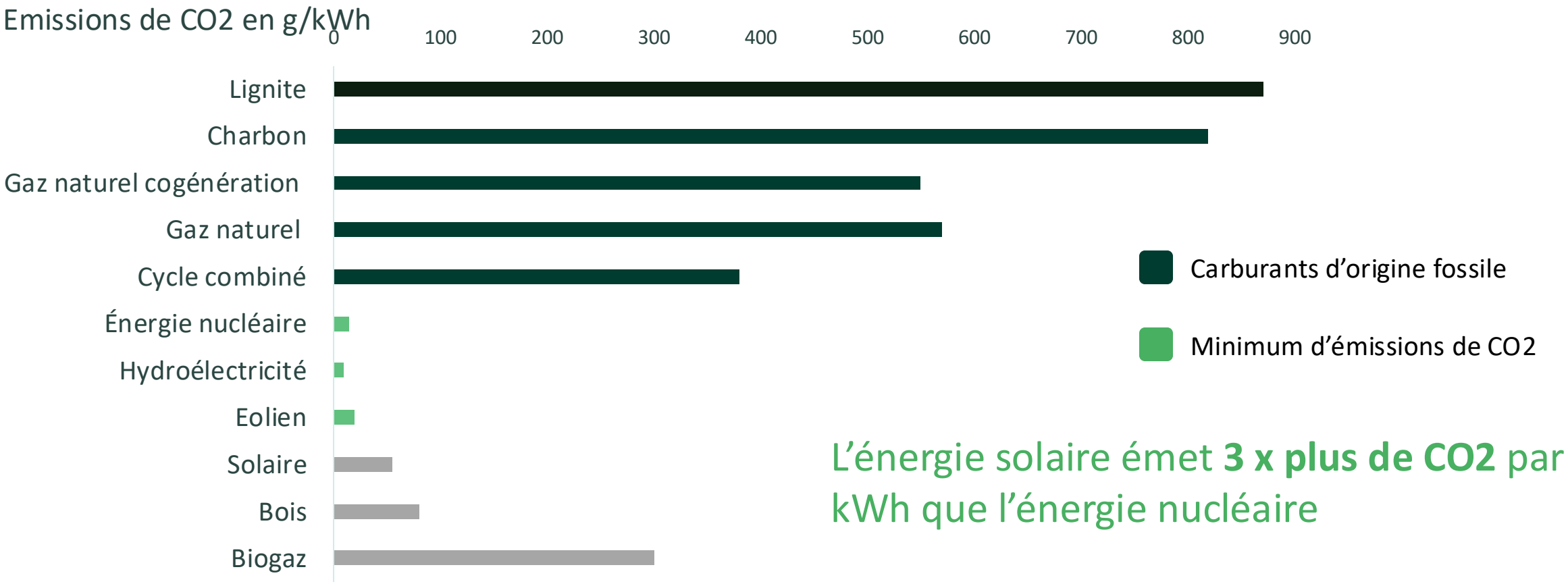
200 tonnes d'uranium

Le combustible actuel est l'uranium (Kazakhstan, Canada,…)

Déclaration de tripler la capacité de l'énergie nucléaire



Comparaison des émissions de gaz à effet de serre dans le cycle de vie des producteurs d'électricité



L'énergie solaire émet **3 x plus de CO2** par kWh que l'énergie nucléaire

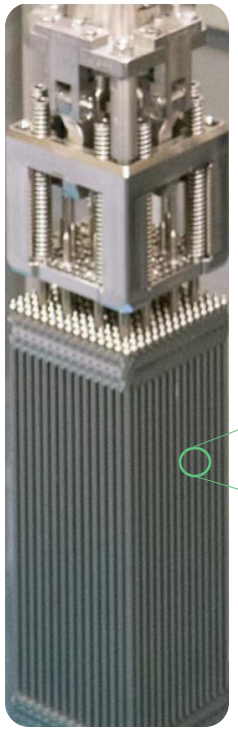
Les conditions de base de la production d’énergie nucléaire

Sécurité et durabilité

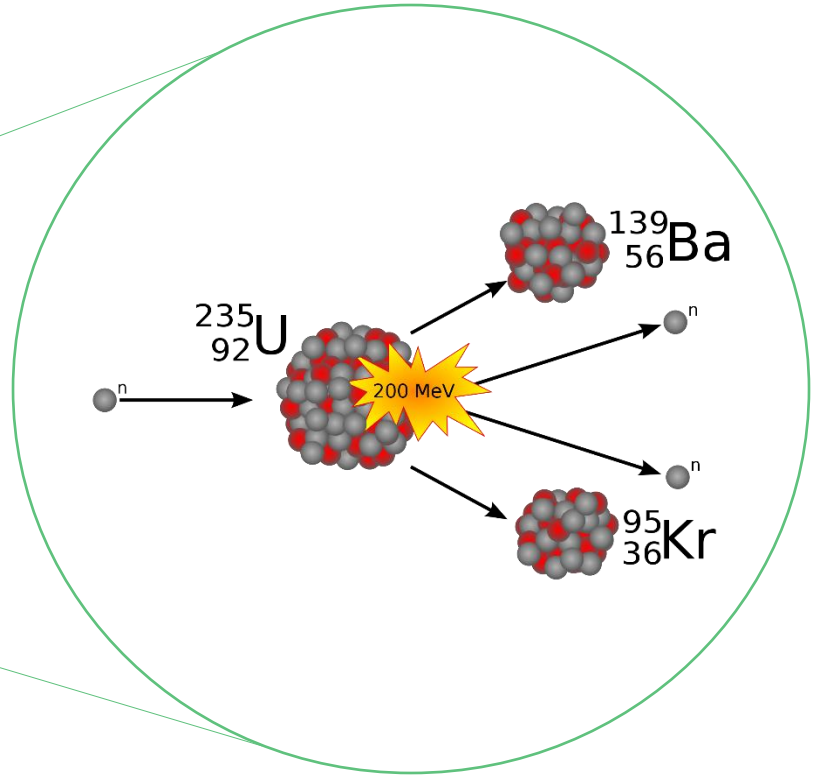
Résistance à la prolifération

Gestion des déchets

Comment sont produits les déchets des centrales nucléaires ?

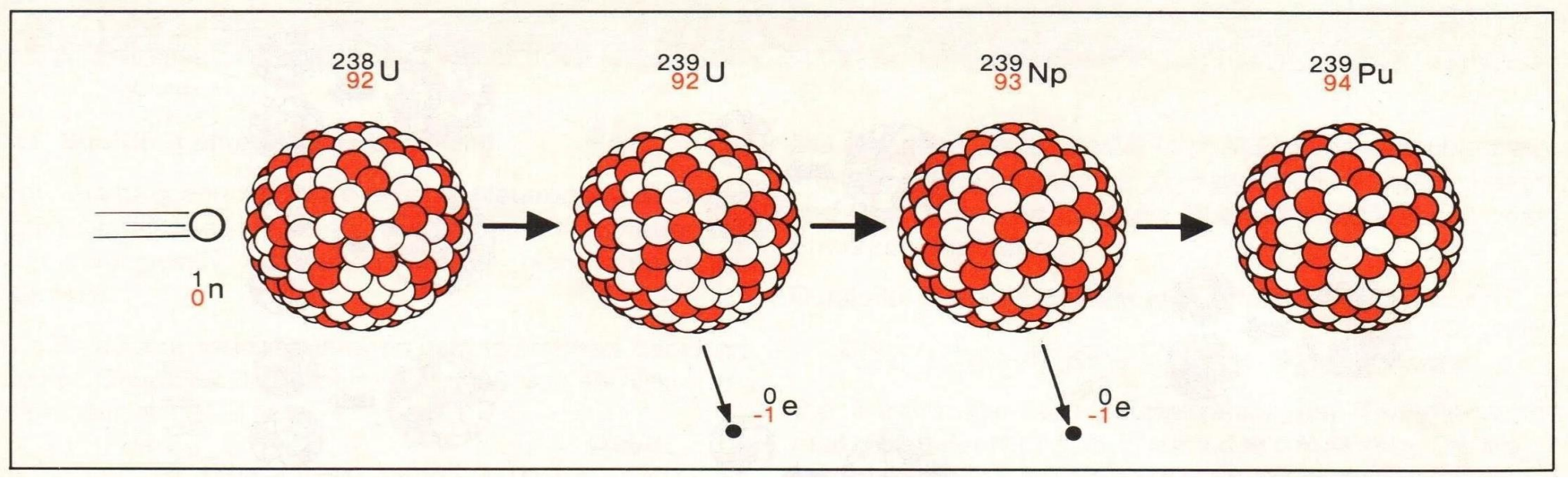


Assemblage de combustible uranium
U-238 + U-235



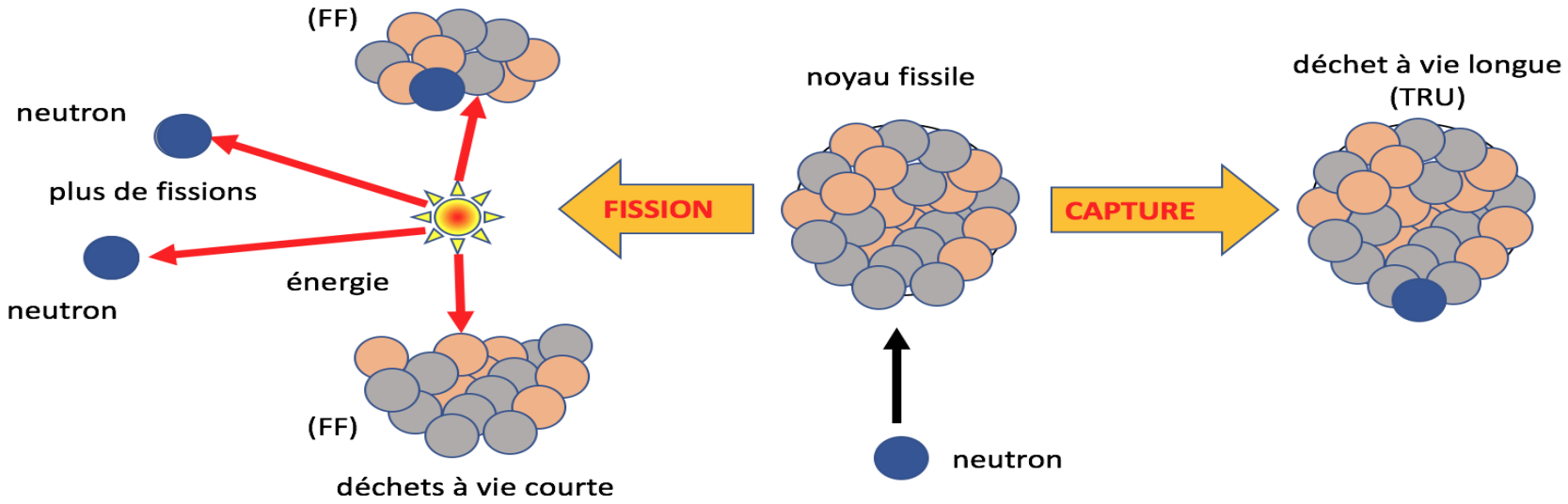
Fission de l'uranium 235

Comment sont produits les déchets des centrales nucléaires ?



Surgénération de transuraniens

Comment sont produits les déchets des centrales nucléaires ?

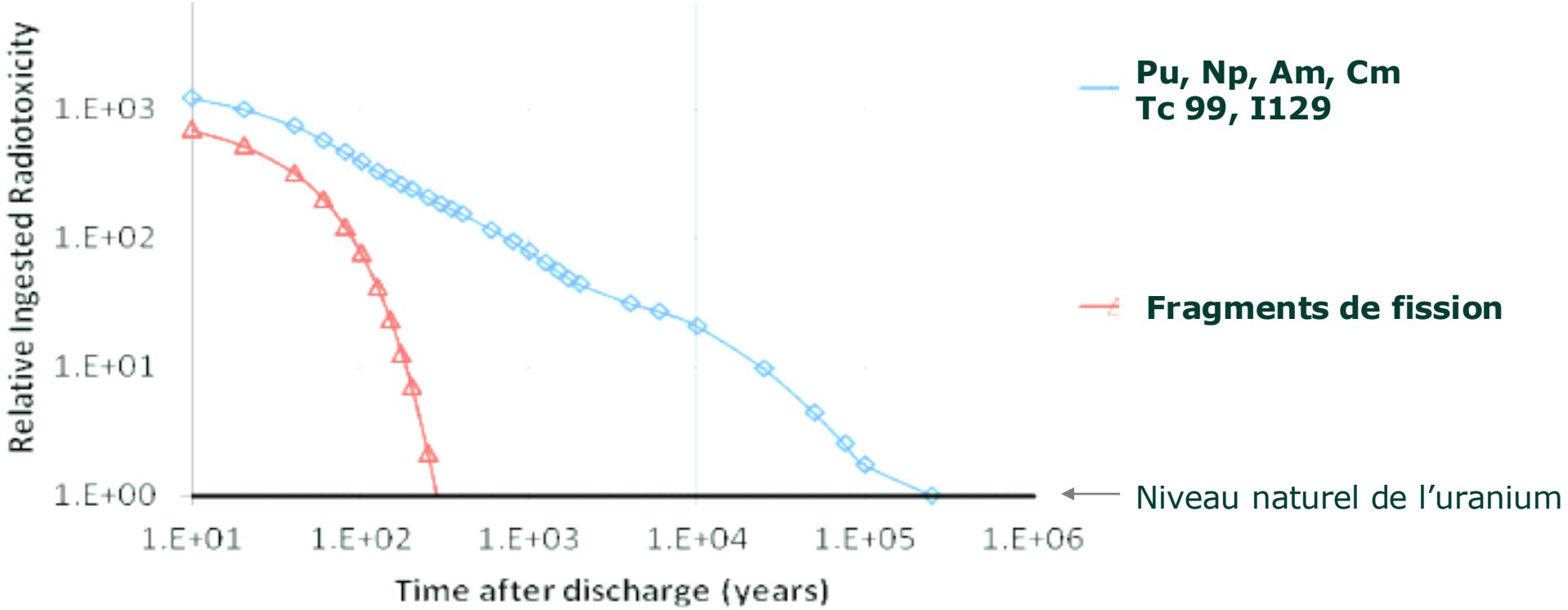


4% **Fragments de fission**
mais Tc 99, I 129

1,1% **Elements transuraniens**
plutonium, neptunium, americium, curium…

Le combustible usé des centrales à uranium est essentiellement de l'uranium non utilisé

La radiotoxicité diminue avec le temps



Source: Yasir Arafat et al., Westinghouse Electric Company

Le cycle du combustible en Suisse

Centrale nucléaire de Gösgen (1979)

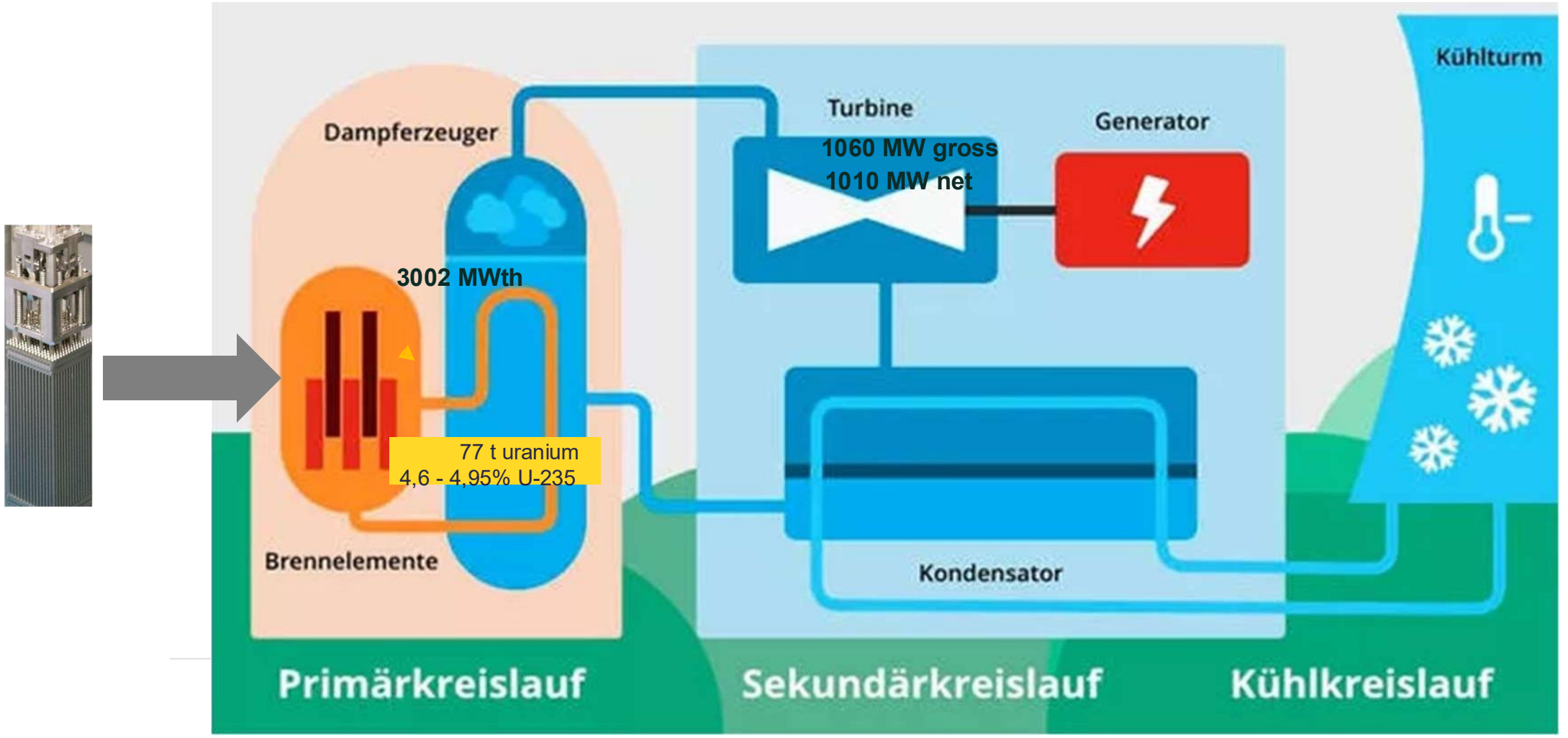
8 milliards KWh/an

92% disponibilité

15% de la demande en électricité de la Suisse

Assez de courant pour
plus d'un million de personnes chaque année

Centrale nucléaire de Gösgen



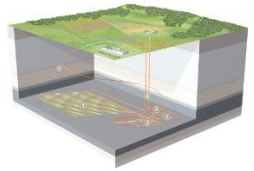
Le cycle du combustible en Suisse

Enrichissement de l'uranium

Production des assemblages

Centrale nucléaire

Stockage intermédiaire



Stockage profond

Processing et conversion

Mines d'uranium

Plan de gestion actuel du combustible usé en Suisse

- Quatre réacteurs nucléaires en service
- Produisent une énergie électrique annuelle d'environ 23,3 TWh el
- Laissent un stock d'environ 2800 tonnes de métaux lourds irradiés pour les 60 années d'exploitation « prévues ».
- Dont 43,5 tonnes de transuraniens et 4 tonnes de produits de fission à vie longue

Zwischenlager, Würenlingen

Les conteneurs attendent d'être éliminés « en toute sécurité »

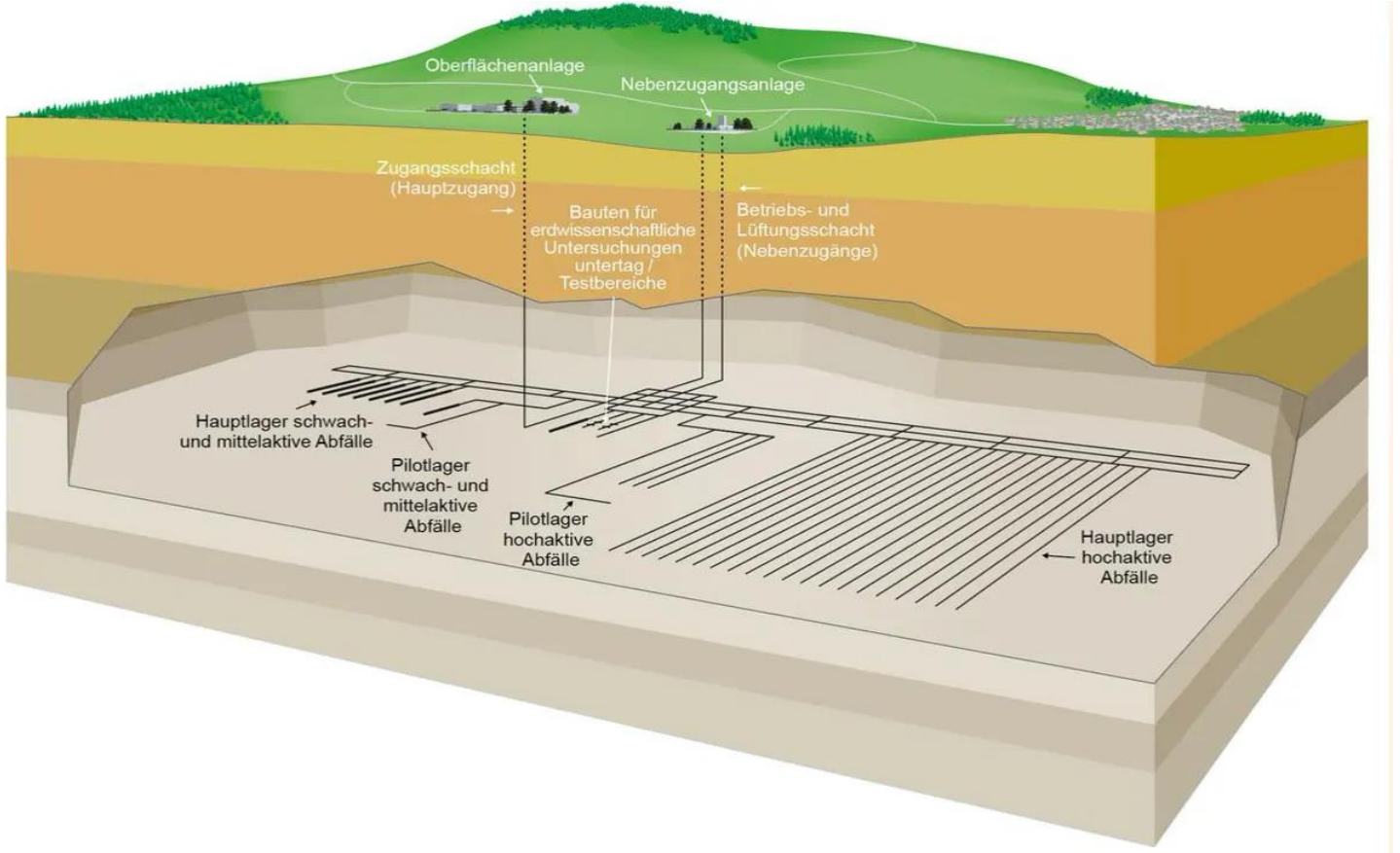
La plupart des pays nucléaires se sont mis d'accord pour enterrer le combustible usé dans des roches situées profondément sous la surface de la terre.

CETTE FOIS TOUT LE MONDE EST CONCERNÉ...
MÊME LES AUTRUCHES !
ON NE PEUT PLUS ÊTRE TRANQUILLE NULLE PART...
GOUTAL

Plan de gestion actuel en Suisse

NAGRA propose un site à Stadel bei Niederglatt pour un enfouissement en couche géologique profonde :

un million d'années



Composition du combustible usé

Situation actuelle

Assemblage neuf UOx KKB

4,7 %
U-235

95,3 %
U-238

Net: 321 kg Métal/ 362 Kg Oxide

Centrale nucléaire

Réacteur
KKB2
6 ans
148 GWh el.

Stockage intermédiaire ZWIBEZ / ZWILAG

Transuraniques
1.4 % — Pu, Np, Am, Cm …

Produits de fission
3.6 % — Cs, Sr, Tc, I, Kr …

0,8 % U-235

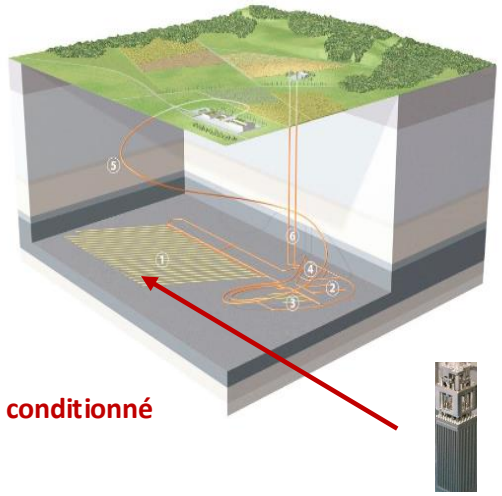
Uranium
95,1 %
recyclable

0,7 % U-236

98.4 % U-238

Planification future

Enfouissement géologique profond



conditionné

L’option innovante proposée par Transmutex à NAGRA

Enrichissement de l‘uranium

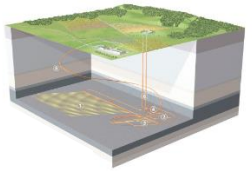
Production des éléments

Centrale nucléaire

Processing et conversion

Mines d‘uranium

Stockage intermédiaire



Stockage profond

Installation de recyclage

Transmutation sous-critique

TRANSMUTEX

Recycler les déchets nucléaires

et cesser de les produire

La proposition de recyclage

Séparation

- Séparation des contenus du combustible usé par **électro raffinage**
- Recyclage de l'uranium non utilisé en vue d'une **réutilisation** (> 95 %)
- **Utilisation industrielle** et médicale de nombreux produits de fission (p. ex. Rh, Kr-85, Cs-137, Sr-90)

Transmutation

- Transmutation de tous les transuraniens avec production d'énergie dans réacteurs rapides
- des principaux produits de fission à vie longue Tc-99, I-129 et Se-79

Réduction de volume et durée

- des produits de fission hautement actifs restants pour le stockage en profondeur (~ 500 ans)

221 MW

Electroraffinage dans un bain de sel avec des électrodes à différents potentiels

Photos: Argonne National Laboratory, Illinois, USA

La transmutation c'est quoi ?

Physique

Passage d'une nature 'vile' à une nature 'noble'

Transformation du noyau de l'atome

La transmutation nucléaire

$$Tc_{43}^{99} + n \rightarrow Tc_{43}^{100} \xrightarrow[15.46\ sec]{} \beta + Ru_{44}^{100}$$

Demi-vie: 211 500 ans **stable**

$$Pu_{94}^{244} + n \rightarrow La_{57}^{148} + Rb_{37}^{94} + 3\,n$$

Demi-vie: 80 Mio. années, α

Nd-148
stable

Zr-94
stable

Réacteurs rapides refroidis au plomb liquide

Sous-marins nucléaires soviétiques de classe Alpha

Prof. G.I. Toshinsky

European alliance to develop lead-cooled SMR

Wednesday, 18 June 2025

Four European nuclear technology organisations have launched the Eagles Consortium to develop and commercialise the EAGLES-300 next-generation lead-cooled small modular reactor with the aim of delivering a first demonstration by 2035.

The agreement was signed on 16 June (Image: SCK CEN

The agreement was signed by Belgium's SCK-CEN nuclear research centre, Italy's national agency for new technologies, energy and sustainable economic development ENEA, Italian company Ansaldo Nucleare, and Romanian state-owned nuclear R&D coordination organisation RATEN

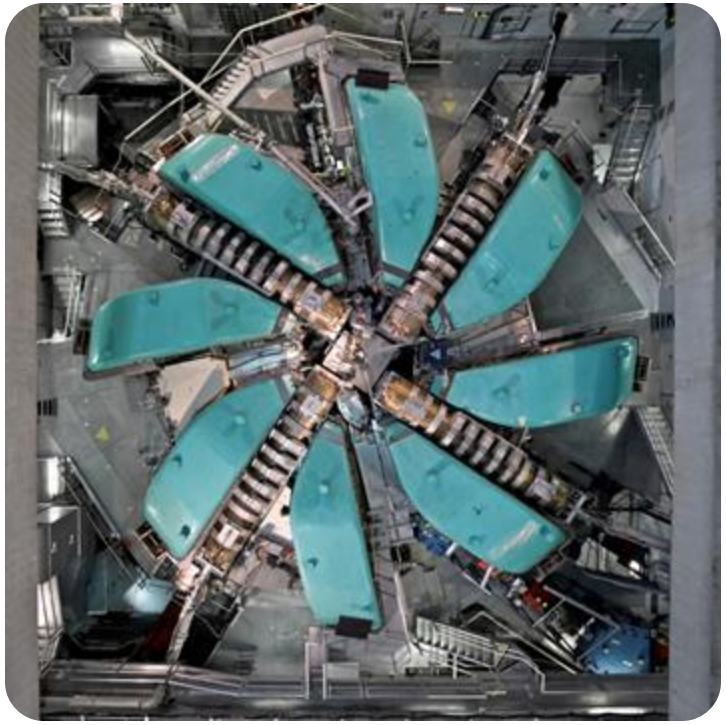
TRANSMUTEX

Un accélérateur pilote les réactions nucléaires, coeur sous-critique

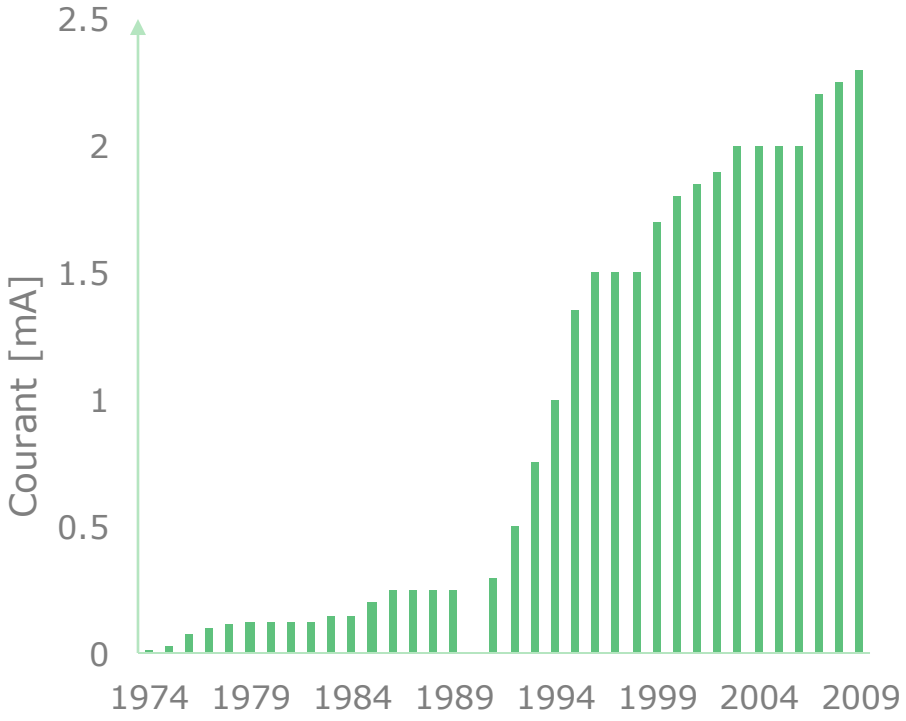
Subcritical
Transmuting
Accelerated
Regenerative
Technology

L'accélérateur inspiré du cyclotron de l'Institut Paul Scherrer en Suisse

Le cyclotron de Transmutex sera controllé par IA, suite aux tests effectués avec succès par Transmutex au PSI



Le plus puissant au monde
en fonctionement depuis 50 ans.

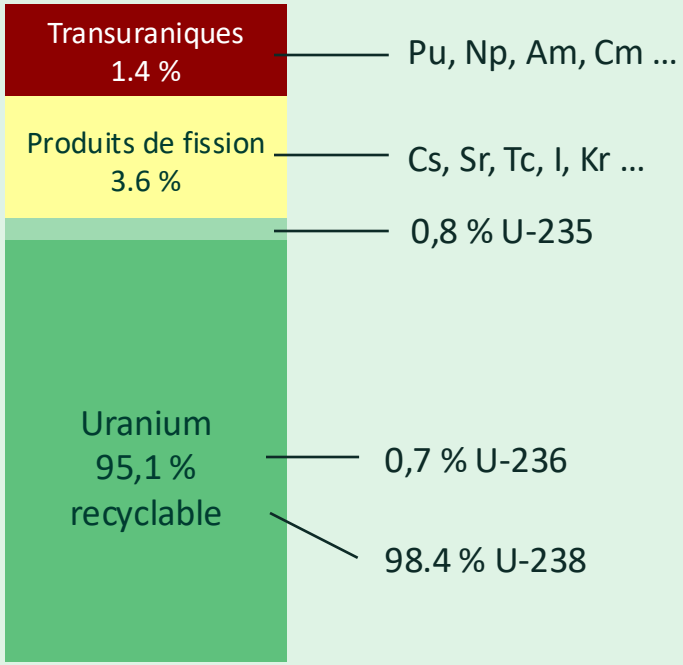


La proposition de recyclage

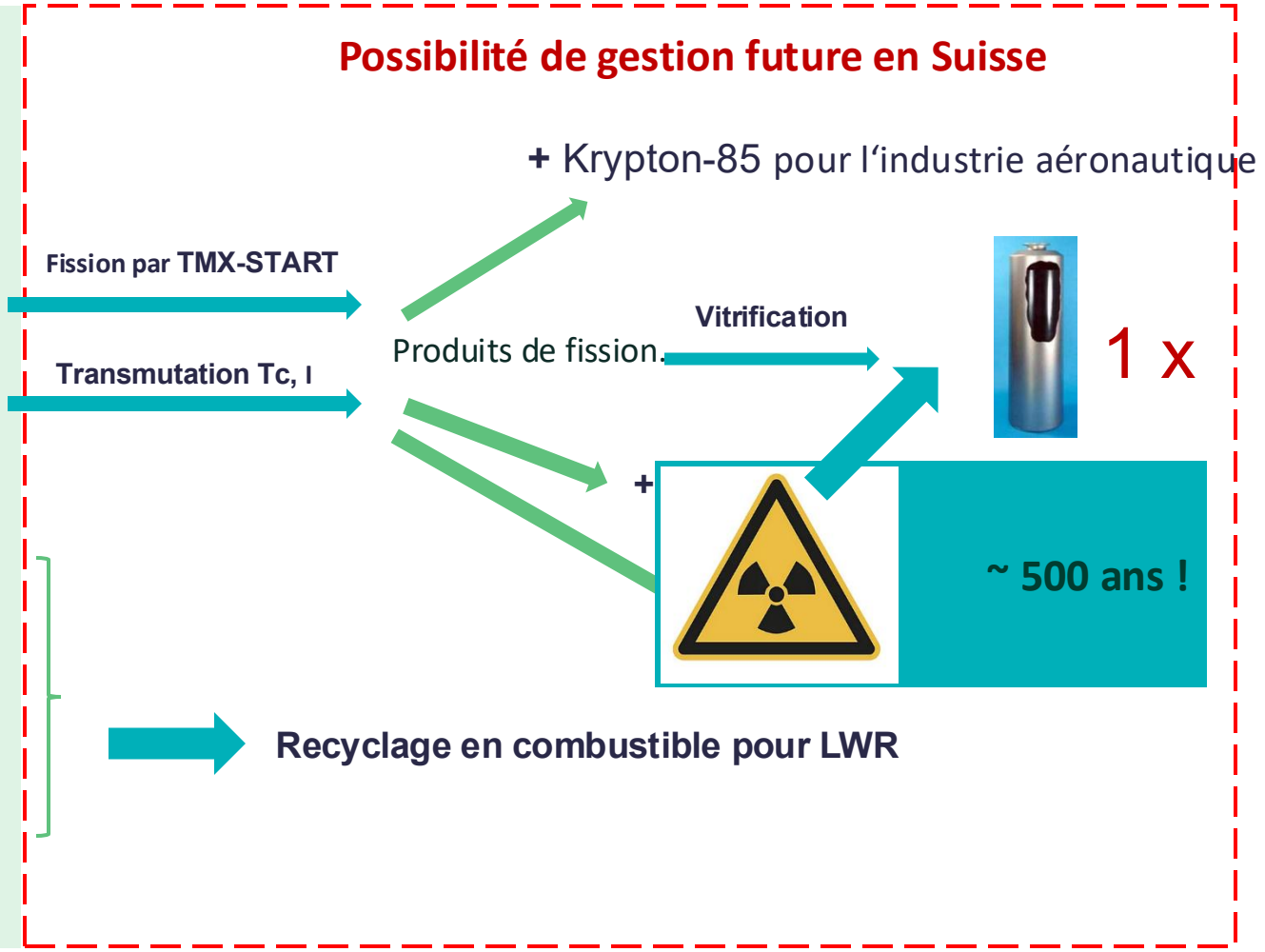
Situation actuelle

Stockage intermédiaire ZWIBEZ / ZWILAG

10x UOX



Possibilité de gestion future en Suisse



Exemple
les assemblages MOX de Gösgen

Kr-85 (8g)

Pour les industries aéronautique et aérospatiale

Tc-99, I-129 en tant que PbI_2

Pour la transmutation avec START

0.1kg I-129 et 0.4kg Tc-99

Éléments métalliques activés

Élimination en tant que déchets moyennement actifs (MAW)

Matériaux de revêtement et de structure, 220 kg

Métaux précieux

Pour diverses industries

0.3kg de Rh, 2kg de Ru et autres

Uranium appauvri

Pour les nouveaux matériaux de l'assemblage de combustible

383kg

Déchets de haute activité (vitrifiés)

Pour une élimination d'une durée de ~300 ans

~13kg

Uranium Spent Fuel

660kg

Unit 15x15

4.8% enrichment

U, Pu, Am, Np, Cm métal en lingots

Pour la production d'énergie dans STA

39kg

Cesium-137, Strontium-90

Pour le traitement du cancer et les utilisations médicales

~1.3kg

TRANSMUTEX

Redynamiser la base industrielle nucléaire - La Maison Blanche

*(i) a recommended national policy to support the management of **spent nuclear fuel** and **high-level waste** and the development and deployment of advanced fuel cycle capabilities to establish a **safe**, **secure**, and **sustainable long-term fuel cycle**;*

Les USA prennent le problème au sérieux

FINANCIAL ASSISTANCE
FUNDING OPPORTUNITY ANNOUNCEMENT

ADVANCED RESEARCH PROJECTS AGENCY – ENERGY (ARPA-E)
U.S. DEPARTMENT OF ENERGY

NUCLEAR ENERGY WASTE TRANSMUTATION OPTIMIZED NOW SBIR/STTR (NEWTON SBIR/STTR)

Announcement Type: Initial Announcement
Funding Opportunity No. DE-FOA-0003419
CFDA Number 81.135

Funding Opportunity Announcement (FOA) Issue Date:	July 16, 2024

Montag, 10. Februar 2025 **Wirtschaft** 23

Neue Zürcher Zeitung

Atommüll-Recycler erhält Millionen aus den USA

Das Schweizer Startup Transmutex entwickelt ein Mini-AKW, das radioaktive Abfälle wiederverwerten soll

JÖRG MEIER

Das Genfer Kernenergie-Startup Transmutex kann einen bedeutenden Erfolg verbuchen. Eine Forschungsabteilung des US-Energieministeriums hat dem Unternehmen 4,3 Millionen Franken zugesichert. Mit dem Geld soll Transmutex seinen völlig neuartigen Reaktor weiterentwickeln.

Das Geld wurde im Rahmen eines speziellen US-Forschungsprogramms gesprochen. Es zielt darauf ab, sogenannte Transmutationstechnologien zu entwickeln. Mit diesen wollen die USA das Volumen und die Halbwertszeit ihres Atommülls massiv reduzieren. Insgesamt sprach das US-Energieministerium Geld für elf Projekte. Transmutex erhält den zweitgrössten Beitrag und ist die einzige nichtamerikanische Einrichtung, die im Rahmen des 40 Millionen Dollar schweren Programms berücksichtigt wurde.

Transmutex entwickelt eine Anlage, die aus zwei Hauptkomponenten besteht: einer Aufbereitungsanlage, die abgebrannte Brennelemente verwertet, und einem kleinen Kernreaktor. Dieser kann aus dem verarbeiteten Atommüll Energie produzieren und gleichzeitig 99,9 Prozent der hochradioaktiven Abfälle umwandeln – ein Vorgang, der sich Transmutation nennt. Zudem verkürzt sich die Zeit, die die Strahlung zum Abklingen benötigt, um den Faktor 1000: Nach etwa 500 Jahren wären die verbleibenden Abfälle so harmlos wie natürliches Uranerz.

Die USA und Deutschland zeigen Interesse an der Kernenergie-Technologie des Startups Transmutex. Blick in ein deutsches Zwischenlager.

THOMAS DEUSCHEL / GETTY

Eine Idee aus Genf

Die Technologie von Transmutex setzt dafür unter anderem einen sogenannten Teilchenbeschleuniger ein. Die Idee hinter dem Reaktor stammt aus dem Cern, Los Alamos zusammentun. Dort soll in den nächsten Jahren ein zentrales Bauteil ihres Teilchenbeschleunigers weiterentwickelt und gebaut werden.

Für Transmutex bedeuten die Gelder aus den USA laut Servan-Schreiber in vieler Hinsicht einen wichtigen Schritt. Zum einen werde das erst gut fünf Jahre alte Startup als wichtiger Partner nicht. Laut dem US-Energiedepartement würde es mindestens 96 Milliarden Dollar kosten, eines einzurichten. Servan-Schreiber macht sich keine Sorgen darüber, dass in den USA inzwischen wieder Donald Trump am Ruder ist. Das werde das Forschungsprogramm eher noch beschleunigen, sagt er.

Transmutex hat inzwischen 50 Mit- (Sprind) eine Studie erstellt. Die Agentur fördert gezielt Technologien, die disruptiv sind oder zu einem Sprung in der technologischen Entwicklung führen. Die Studie sollte herausfinden, welche Rolle die Technologie von Transmutex in Deutschland spielen könnte. Das Land ist gemäss dem Geschäftsführer von Transmutex Deutschland, Guido werke in Betrieb. Heute lagert der Atommüll noch immer in den inzwischen abgeschalteten Anlagen. Transmutex schlägt in der Studie darum vor, die neuen Anlagen an den früheren AKW-Standorten zu bauen.

Das würde einen Transport der Abfälle durchs Land unnötig machen und gleichzeitig die Kosten pro Anlage von 2,5 Milliarden Euro auf noch 1,5 Milliarden reduzieren. Dies etwa darum, weil viele Teile der Infrastruktur der alten Kernkraftwerksstandorte weiter benutzt werden könnten. Um die deutschen Kernabfälle zu verwerten, wären gemäss den Berechnungen von Transmutex rund 20 Anlagen nötig.

In der von Sprind finanzierten Studie liess Transmutex sein Konzept von drei unabhängigen Fachstellen bewerten. Der TÜV Nord hat abgeklärt, ob die derzeitigen deutschen Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke den Bau eines Reaktors von Transmutex überhaupt zulassen. Die Erkenntnis: Das Vorhaben sei grundsätzlich durchführbar. Allerdings müsse Transmutex noch einige detaillierte Ergänzungen über seine Technologie liefern, die dem Unternehmen «durchaus Arbeitsaufwand» verursachen werden, wie die Experten vom TÜV Nord anmerken.

Der Betrieb wäre wirtschaftlich

Eine renommierte deutsche Anwaltskanzlei hat zudem vertiefte juristische Abklärungen durchgeführt. Sie kommt zwar zu dem Schluss, dass es derzeit an Rechtssicherheit für den Bau des neuartigen Reaktors fehlt. Die Studie zeigt aber auf, wie das Gesetz geändert werden könnte, um den Bau einer solchen Anlage zu ermöglichen. Finanzexperten der Technischen Universität in München haben untersucht, ob die Anlagen wirt-

L'Allemagne aussi

Transmutex a étudié les déchets du réacteur Isar 2 en Bavière pour le compte de l'agence fédérale allemande pour les innovations SPRIN-D

- 1410 MWe net (1485 MW brut)
- 36 ans en service depuis 4/1988
- 334,4 milliards de kWh d'électricité fournis
- 1426 éléments de combustible usés
- 72 conteneurs de transport et de stockage

  CASTOR et Transnucléaire

L'Allemagne aussi

Transmutex a étudié les déchets du réacteur Isar 2 en Bavière pour le compte de l'agence fédérale allemande pour les innovations SPRIN-D

11,3% réduction de volume

8,8 facteur de réduction

810 ans durée de vie du RAD

facteur de réduction > 40 000

Option représentative des grands réacteurs à eau sous pression de génération III / IV

TRANSMUTEX

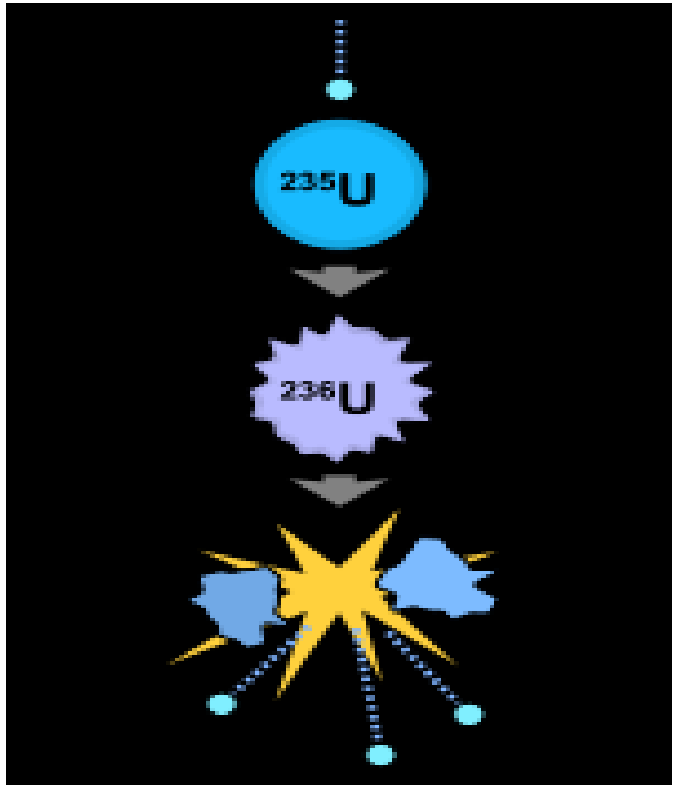
Recycler les déchets nucléaires

et cesser de les produire

Le thorium, une resource non utilisée, largement disponible

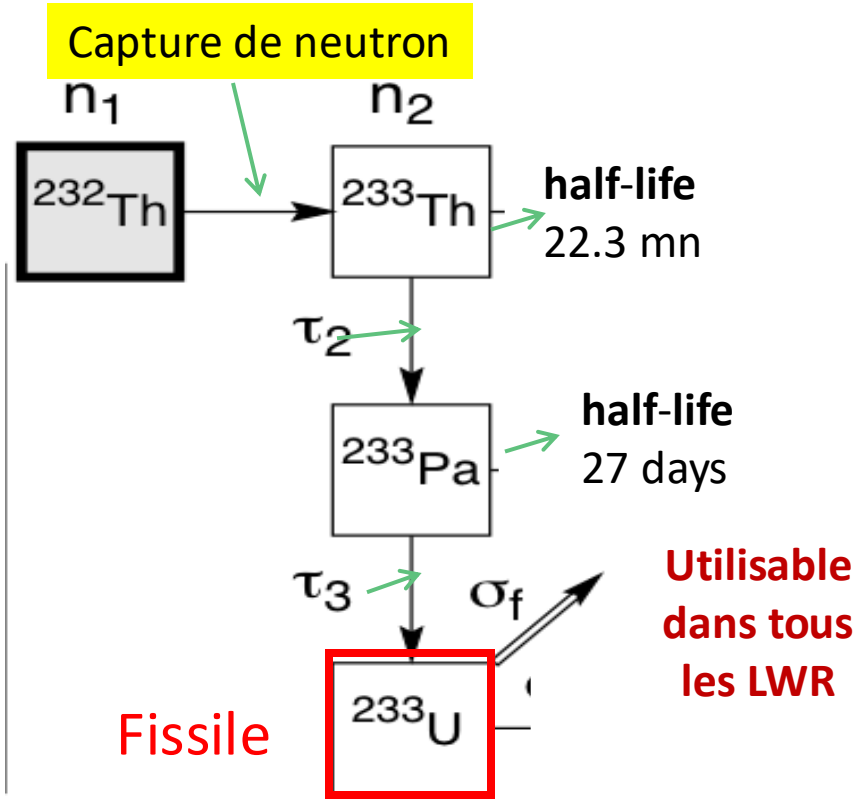
Fissile

Fission de l'uranium
(ou du plutonium)



Fertile

Conversion avec le thorium



Le thorium, une resource non utilisée, largement disponible

Avantages

- Ne produit pas d'éléments radioactifs à longue durée de vie
- Fertile, non fissile, donc pas d'enrichissement nécessaire
- Meilleure résistance aux risques de prolifération
- Excellentes propriétés physiques
- Largement répandu et disponible en abondance

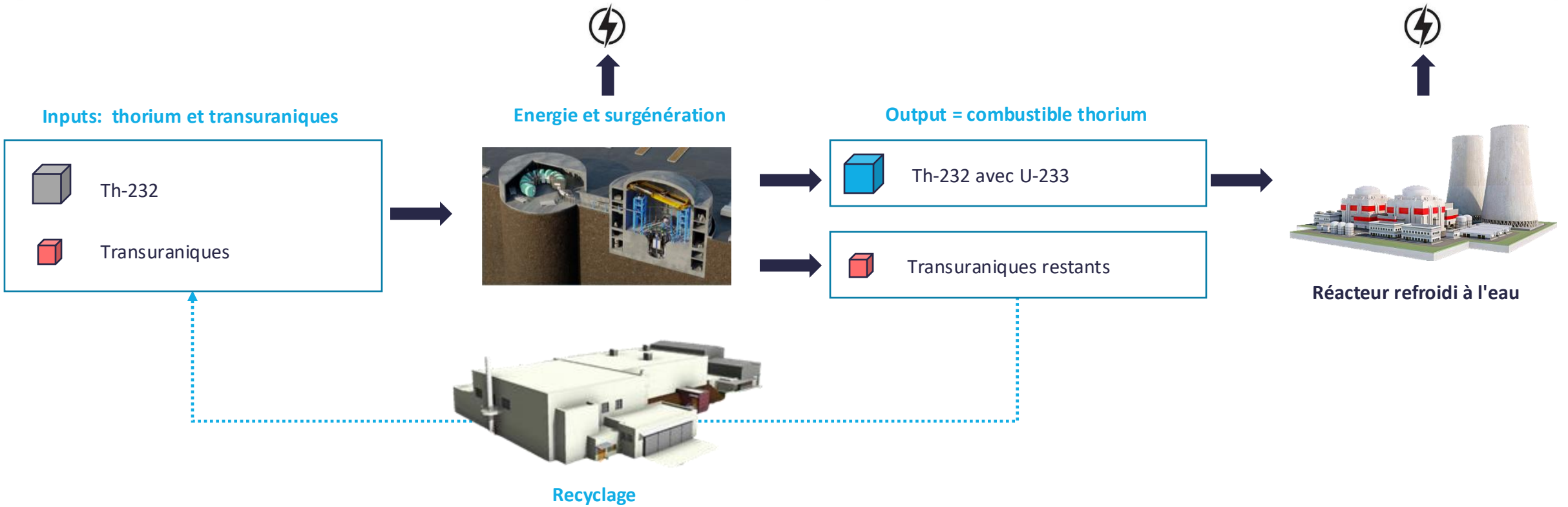
minéral monazite = lanthanides + thorium

Source: P.K. Wattal, BARC, India

Proposition de Transmutex avec combustible thorium

Production d'énergie + Breeding = Combustible au thorium pour les réacteurs refroidis à l'eau

Cycle du combustible au thorium = moins de déchets et plus d'efficacité énergétique



Comment la Suisse pourrait-elle bénéficier de la transmutation ?

- Au moment de l'étude de Transmutex, la Suisse comptait **12 442 assemblages** combustibles usés.
- Comme 4 réacteurs continuent à produire de l'électricité, cette quantité va **encore augmenter**.
- Actuellement, les éléments combustibles usés sont stockés au **Zwilag** après leur période de refroidissement.
- Une extension du Zwilag semble probable

Quels sont les transuraniens déjà présents ?

Inventaire transuranien du combustible usé au début de l'étude en 2024, en kg

Réacteurs	Mühleberg [kg]	Leibstadt [kg]	Gösgen [kg]	Beznau [kg]
Plutonium	2 281	14 375	11 909	9 426
Americium	195	1 123	462	985
Neptunium	148	906	898	423
Curium	21	105	182	95
Sonstige Actinide	0,4	2	1	1
Sous total	2 645	16 511	13 452	10 930
Total	**43 538 kg**			

Comment la Suisse pourait-elle bénéficier d'une offre de Transmutex ?

Transmutex propose, avec le réacteur sous-critique START piloté par un accélérateur

- réduire les déchets hautement radioactifs de la Suisse à **16,2 % en 50 ans.**
- réduire la période de décroissance de la radioactivité des déchets hautement actifs à environ **830 ans.**
- **approvisionner** une centrale nucléaire en combustible pour l'ensemble des **50 ans**.
- fournir **1326 MWe de charge de base** pendant 50 ans avec 6 START.
- assurer une **compatibilité** avec les formes de production renouvelables.
- une plus grande **indépendance** vis-à-vis du marché international de l'uranium.
- créer un **produit d'exportation** du futur (Inde, Roumanie, Allemagne, Canada ...)

Pas un retour, mais une continuité modernisée

- Il ne s'agit pas d'un retour au nucléaire, car le nucléaire fait déjà partie de notre réalité énergétique, depuis **plus de 50 ans.**

- Aujourd'hui, **un tiers de l'électricité suisse** est produite grâce à nos centrales nucléaires. Et en hiver, nous **importons** souvent de **l'électricité nucléaire française**.

- La question n'est donc pas "pour ou contre", mais plutôt :

Comment assurer cette production dans le future, avec des technologies encore plus sûres et sans déchets de longue durée de vie ?

- **Lever les interdits qui empêchent les PME suisses de poursuivre leurs développements…en Suisse.**

Résumé

La transmutation avec le thorium allie :

- la **réduction des déchets de longue durée de vie** présents et futurs
- avec la production d'un **nouveau combustible nucléaire**
- Une **innovation suisse**: un **nouveau cycle** du combustible, applicable dans le **monde entier**, **sans risque de prolifération**
- **Des réformes de la législation sont nécessaires pour rendre cela possible en Suisse.**
- Un site pour un **prototype** en discussion en Inde, aux Etats-Unis, en Allemagne

Merci !

Contactez-nous pour plus d’informations

info@transmutex.com

TRANSMUTEX

Chemin de Blandonnet 8

1214 Vernier

www.transmutex.com

Annexe

TRANSMUTEX

Rôle et avantages de la thérapie nucléaire

Un pilier du traitement du cancers:

- Complémentaire à la chirurgie et aux thérapies systémiques (ex : chimiothérapie).
- Contribue à **40 % des guérisons du cancer** dans le monde.
- Bénéficie à plus de **50 % des patients** au cours de leur traitement.

Un coût maîtrisé :

- Représente seulement **5 à 7 % des dépenses totales** liées aux traitements du cancer.

Outils diagnostiques associés :

- Imagerie radiologique : rayons X, scanner, IRM.
- Imagerie nucléaire : TEP et TEMP pour une vision fonctionnelle.

TRANSMUTEX

Modalités thérapeutiques et production des isotopes

Modalités de traitement :

- Thérapie par radionucléides : Iode-131 (cancer de la thyroïde), Strontium-89 (douleur osseuse)…
- Radiothérapie externe.
- Curiethérapie : radiation interne ciblée.

Production des isotopes :

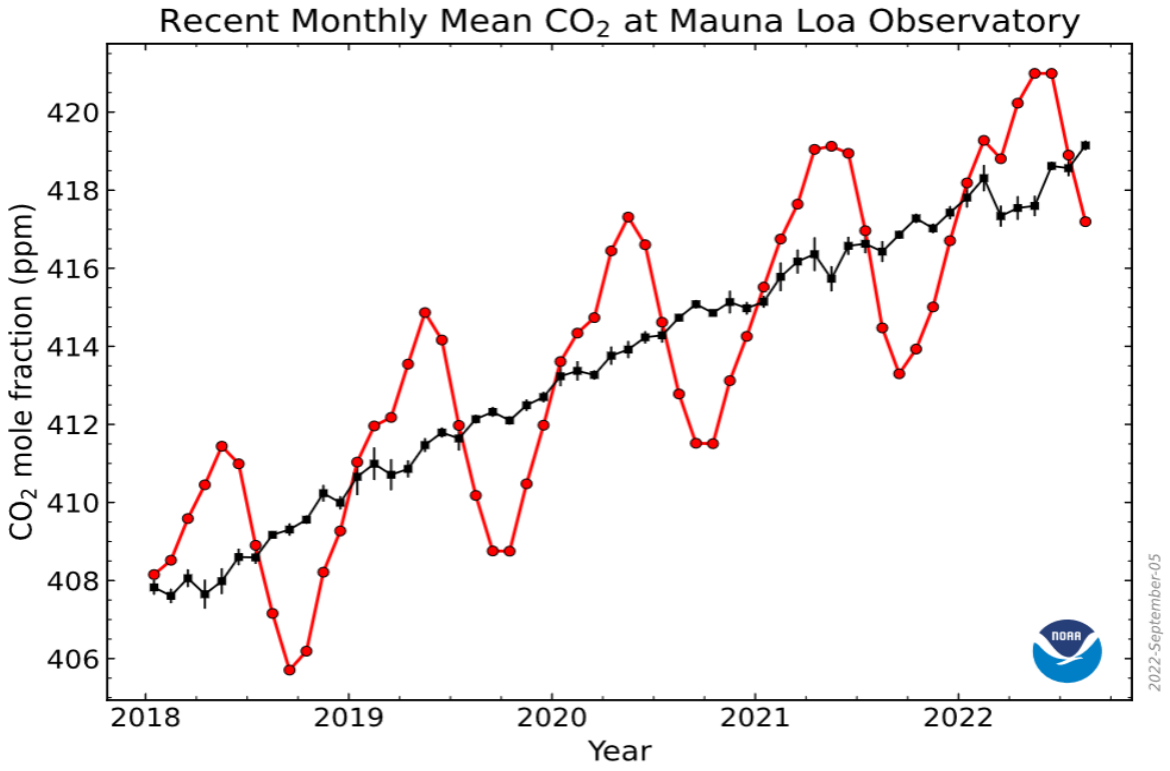
- Réacteurs nucléaires : isotopes à longue durée de vie (coûts et régulations élevés).
- Cyclotrons : isotopes à courte durée de vie (ex : Fluor-18, N-13), adaptés à un usage local ou régional.

Renforcer la médecine nucléaire suisse dans le contexte plus large du développement futur de l'énergie nucléaire.

TRANSMUTEX

Contexte de l'émission nette zéro de CO_2

Depuis l'accord de Paris de 2015 et les rapports du GIEC, de nombreuses stratégies ont été définies pour parvenir à des émissions nettes de CO2 nulles d'ici 2050.



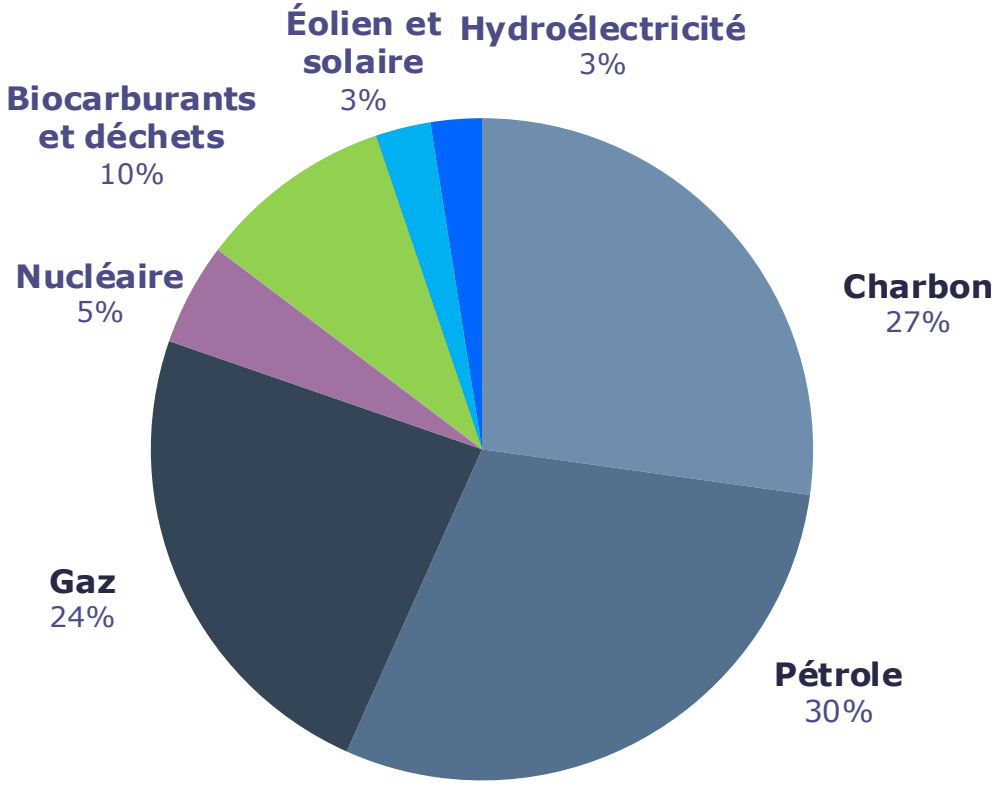
Net-Zéro

Condition dans laquelle la quantité de gaz à effet de serre émise dans l'atmosphère est compensée par une quantité équivalente qui en est retirée.

TRANSMUTEX

Energie mondiale

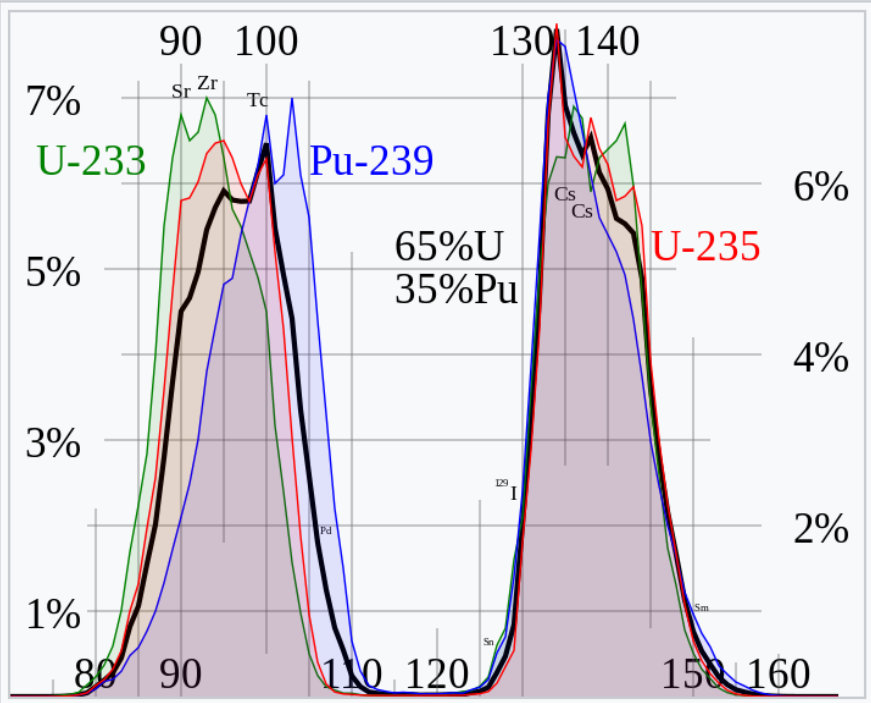
80 % de l'énergie mondiale provient des combustibles fossiles en 2021



TRANSMUTEX

Composition du combustible usé

Produits de fission: 3 à 4 % du combustible usé



Fission product yields by mass for thermal neutron fission of U-235 and Pu-239 (the two typical of current nuclear power reactors) and U-233 (used in the thorium cycle)

Medium-lived fission products [*further explanation needed*]

	$t_{1/2}$ (year)	Yield (%)	Q (keV)	βγ
^{155}Eu	4.76	0.0803	252	βγ
^{85}Kr	10.76	0.2180	687	βγ
^{113m}Cd	14.1	0.0008	316	β
^{90}Sr	28.9	4.505	2826	β
^{137}Cs	30.23	6.337	1176	βγ
^{121m}Sn	43.9	0.00005	390	βγ
^{151}Sm	88.8	0.5314	77	β

Long-lived fission products V · T · E

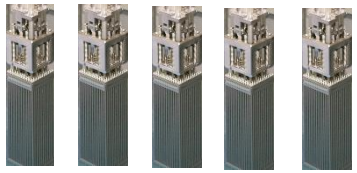
Nuclide	$t_{1/2}$ (Ma)	Yield (%)[a 2]	Q[a 1] (keV)	βγ
^{99}Tc	0.211	6.1385	294	β
^{126}Sn	0.230	0.1084	4050[a 3]	βγ
^{79}Se	0.327	0.0447	151	β
^{135}Cs	1.33	6.9110[a 4]	269	β
^{93}Zr	1.53	5.4575	91	βγ
^{107}Pd	6.5	1.2499	33	β
^{129}I	15.7	0.8410	194	βγ

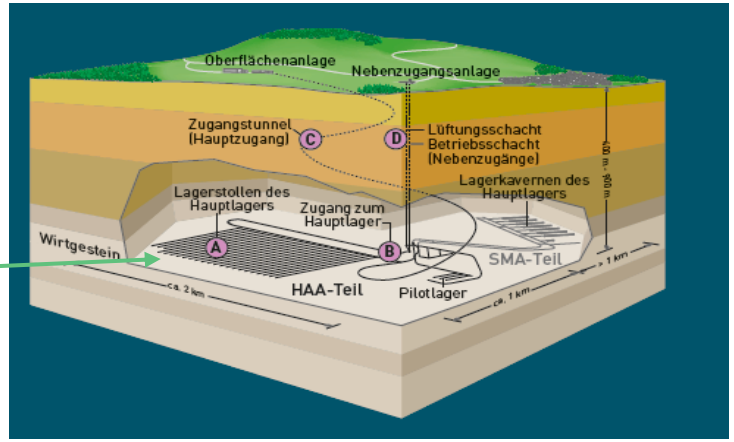
1. ^ Decay energy is split among β, neutrino, and γ if any.
2. ^ Per 65 thermal neutron fissions of ^{235}U and 35 of ^{239}Pu.
3. ^ Has decay energy 380 keV, but its decay product ^{126}Sb has decay energy 3.67 MeV.
4. ^ Lower in thermal reactors because ^{135}Xe, its predecessor, readily absorbs neutrons.

TRANSMUTEX

Résultats de transmutation pour la Suisse

Les lingotières en verre contenant des déchets radioactifs vitrifiés sont déjà qualifiées aujourd'hui et sont également utilisées par Transmutex.





~ Facteur 6.2 Réduction de volume

Résultat d'une étude réalisée en 2024 avec des données de la Nagra :

- Réduction du **volume de 1930 conteneurs** de stockage définitif HAW à **313 conteneurs** HAW = 16,2 %
- Facteur de **réduction 6,2** HAW Durée de vie : **830 ans**

L'équipe de Transmutex SA

Franklin Servan-Schreiber

CEO

Donovan Maire

CTO

Craig Kelly

CFO

52
Collaborateurs

20
PhDs

17
Nationalités

Dr Franz Strohmer

Head of Fuel

Equipe: 4

Jean-Christophe de Mestral

Director & Head of Government Relations and Regulatory Affairs

Dr Massimo Barbagallo

Head of Target

Equipe : 4

Dr Marco Busch

Head of Cyclotron

Equipe : 5

Dr Vasudha Verma

Head of Transmutation Reactor Unit

Equipe : 6

Dr Guilhem Lacaze

Head of Software

Equipe : 6

Réacteurs rapides refroidis au plomb liquide

25 ans de recherches en Europe

Accelerator

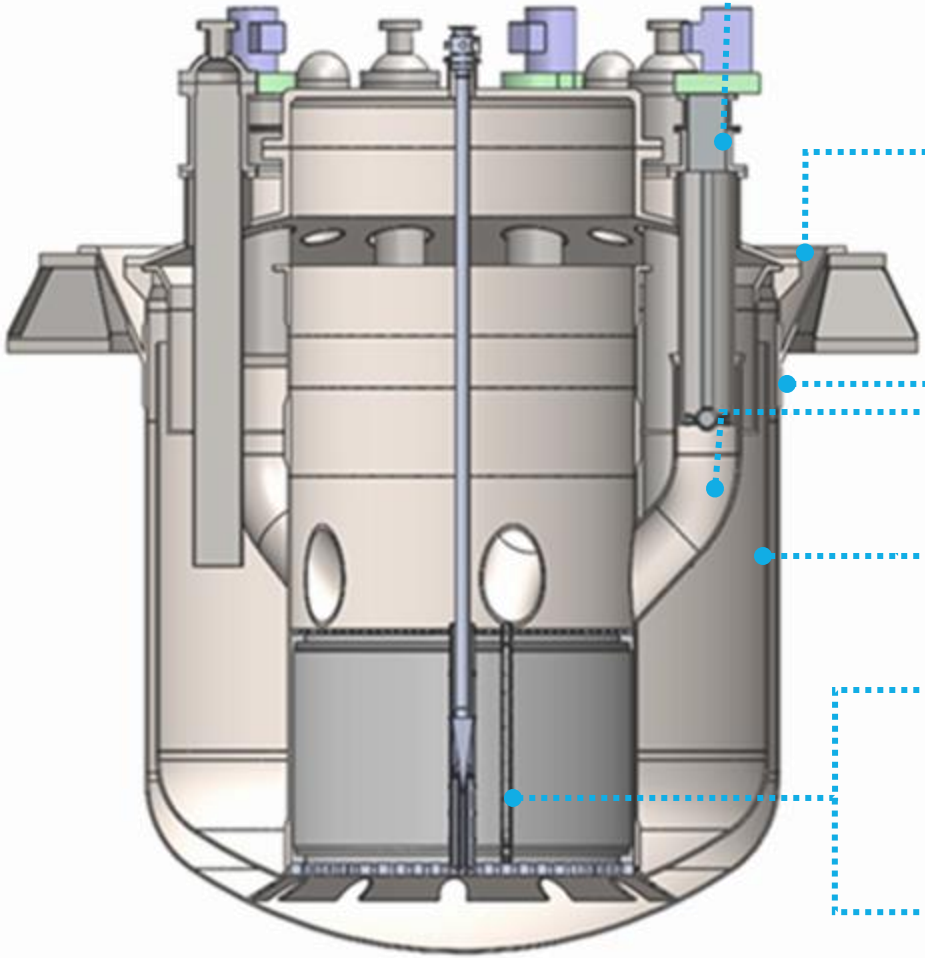
Type	Cyclotron
Energy	0.8 GeV
Current	5 mA
Power	4 MW
Oper. mode	CW

Spallation Target

Material	Pb
Type	Loopless
Configuration	Window

Sub-Critical Reactor

Power	600 MW_{th}
k_{eff}	< 0.98
Coolant	Pb



- Extraction of 600 MWth with 2 redundant systems for passive decay heat removal
- Primary pool-type system
- Guard vessel for enhanced safety
- Natural circulation and passive cooling in case of shutdown
- No thermal stratification
- Thorium fuel: transmutation of 72 kg / TWhe
- Metallic fuel: no neutron moderation, high thermal conductivity, and short cooling time