我が国の高速炉開発の状況

令和元年12月9日

日本原子力研究開発機構
佐賀山　豊

わが国における高速炉サイクル開発の経緯

2018年7月**第5次エネ基**（核燃料サイクル開発維持）

2016年12月**もんじゅ廃止措置決定**

2011年3月**東日本大震災**

2006年8月**原子力立国計画**（2025年頃までに実証炉）

2005年10月**原子力政策大綱**（2050年頃からの商用化）

1994年
もんじゅ初臨界

1977年
常陽初臨界

1966年
動力炉開発の基本方針

自主的な開発が必要、
実験炉、原型炉の開発を推進

1970　1980　1990　2000　2010　2020

2018年12月
戦略ロードマップ

2016年12月
高速炉開発の方針

2006～2011年（凍結）
FaCTプロジェクト

1999～2006年
実用化戦略調査研究（FS）

1985～1999年
電気事業者が中心となって実証炉開発

原子力立国計画　6. 高速増殖炉サイクルの早期実用化

1. 高速増殖炉サイクル実用化に向けた移行シナリオの策定

ー 原型炉「もんじゅ」の早期再開により、“信頼性の実証”と“ナトリウム取扱技術の確立”を実現する。
ー 実証炉及び関連サイクル施設は2025年頃までの実現を目指す。
ー 六ヶ所再処理工場の操業終了時（2045年頃）に、第二再処理工場を操業開始し、高速増殖炉用の燃料向けの再処理を行う。
ー 商業炉を2050年より前に開発し、以後運転を終える既設の軽水炉は順次高速増殖炉にリプレース。

2. 移行シナリオにおける国の役割の明確化

ー 高速増殖炉サイクルの実証段階における軽水炉発電相当分のコストとリスクは民間負担を原則とし、それを超える部分は相当程度国の負担とする。
ー 実施主体については、経済性等の見通しが現実的な視野に入っている場合には、民間事業者が実質的に運営することが適当である。民間事業者の運営が困難な状況である場合には、スケジュールに柔軟性をもたすとともに、当面、国が相当程度関与することが必要な場合も想定され得る。基礎的・基盤的研究開発段階から実証プロセスへの技術の移転や継承を円滑に行うためには、日本原子力研究開発機構が実施主体に参画することが有益である。他方、実証段階から実用段階への技術移転・人材育成のためには、民間事業者の実施主体への参画が必要である。

3. 戦略的な国際協力の推進

高速増殖炉サイクルを支える基盤となり、かつ世界をリードしうる技術（枢要戦略技術）に集中した戦略的開発を行うとともに、これを集約したシステムの世界市場での採用を通じた国際標準化など、戦略的な国際協力を推進する。あわせて、その他の技術についても諸外国と連携をとりつつ、遅滞なく開発を進める。

4. 実証・実用化への円滑な移行のための協議の開始

現在進められている実用化戦略調査研究（研究開発段階）から実証・実用段階に円滑に移行するため、実用化戦略調査研究の終了を待たずにすみやかに研究開発側と導入者側とで円滑な移行に向けて協議を開始する（経済産業省、文部科学省、電気事業者、メーカー、日本原子力研究開発機構）。またその内容をつめるため、学識経験者を交えた研究会を設置する。

5. 実証・実用化に向けた予算の確保

高速増殖炉サイクル技術の実証・実用化のためには、将来のビジョンだけでは絵に描いた餅にすぎない。このため、高速増殖炉サイクル技術の実証・実用化に向けた予算の確保に特段の取組が求められる。

各国の高速炉開発の状況

	現状	新たな取り組み、予定
米	・実験炉（EBR-II）やFermi炉の運転経験 ・技術維持の観点から、研究開発を継続	・2027年末までに多目的試験炉VTR(300MWt)運転開始予定 ・NELA法案が上・下院で審議中。これが議会で承認されると、2027年を目途に2つの技術実証炉に国が50%の支援
仏	・2013年より技術実証炉ASTRIDの建設を目指した概念設計を開始し、基本設計を終了	・「ASTRID計画」を2020年以降、凍結 ・シミュレーション技術等SFR関連R&D継続 ・SFR以外の高速炉概念も検討
韓	・米韓協力を通じて金属燃料を採用した原型炉(PGSFR：150MWe)の概念検討を実施	・2017年の文政権の脱原発政策により、今後の動向は不透明 ・2028年原型炉建設完了の計画は維持しているが、不透明
露	・原型炉 BN600：運転中 ・実証炉 BN800：2015年12月初送電後運転中	・商用炉 BN1200 2032年頃運転開始 ・MBIR（照射炉）2025年運転開始
中	・実験炉 CEFR(20MWe) 2011年7月初送電 ・原型炉をスキップしてCFR600の開発に着手	・実証炉 CFR600 2023年建設完了予定 ・2030年代後半 商用炉導入の計画
印	・実験炉 FBTR(13MWe)を運転中 ・原型炉 PFBR(500MWe) を2015年に建設終了	・原型炉 PFBR 2020年初臨界予定 ・商用炉 CFBR(600MWe) 2029年頃からシリーズに6基（2年毎）導入の計画

高速炉開発を取り巻く国際情勢

- 開発中心国の変動
  ⇒ 一国(単独)開発の限界、国際協働提唱（フランス）
  技術占有(ロシア、中国、インド)

- 原子力発電プラント開発・必要性再評価（アメリカ、イギリス、カナダ）
  ⇒ 民間活力掘り起し、技術イノベーション、SMR開発

- 発電炉への安全要求の高まり（国内）
  ⇒ 外部事象対応、SA対策等の規制強化→それに伴う建設コスト増大

- 変動再生可能エネルギー導入機運台頭＆本格化（国内外）
  ⇒ 電力網再編、蓄ｴﾈ、出力調整機能要求、開発の優先度変化

今後の開発方針(1/3)

「高速炉開発の方針」（2016年12月20日　原子力関係閣僚会議決定）

- 我が国は「エネルギー基本計画」※に基づき、核燃料サイクルを推進するとともに、高速炉の研究開発に取り組むとの方針を堅持。
  - 昨今の情勢変化（福島事故後の安全性の要請、電力自由化、国際動向）を踏まえて、世界最高レベルの高い安全性と経済性の同時達成を追求。

※第4次エネルギー基本計画（2014年4月11日閣議決定）

- 今後の高速炉開発は①国内資産の活用、②世界最先端の知見獲得、③コスト効率性の追求、④責任体制の確立という4原則を関係者で共有して推進。
  - 開発方針を具体化する「戦略ロードマップ」を2018年目途に策定し、「実証ステージ」における今後10年程度の開発作業を特定。（2017年初頭から「戦略ワーキンググループ」を設置して検討）
  - まずはプラントデザインの決定に開発リソースを集中投入。
  - 国際協力が国内プロジェクトと相乗効果を生み出すよう全体統括をしながら、日仏ASTRID協力、日米協力等の国際協力、常陽、その他の国内施設を活用。もんじゅ再開で得られる予定であった知見は、国際協力等の方策で入手。

今後の開発方針(2/3)

「戦略ロードマップ」（2018年12月21日　原子力関係閣僚会議決定）

- 「高速炉開発の方針」に基づき、今後10年程度の開発作業を特定する「戦略ロードマップ」を策定。
- 基本的考え方
  - 高速炉開発の意義として、資源の有効利用性、廃棄物の減容、有害度の低減という3点の重要性は不変ながら、プルトニウムマネジメント、MOX使用済み燃料処理という要素も追求する必要がある。
  - ウランの現状を踏まえると、高速炉の本格的利用のタイミングは21世紀後半のいずれかのタイミング。そのため、次期高速炉の運転開始は21世紀半ば頃に期待。
  - 今後10年程度の各プレーヤーの役割：
    - 国：エネルギー基本計画等を通じた原子力開発の方向性、高速炉の開発目標を提示。民間リソースの活用を前提とした適切な規模の財政支援。
    - 電気事業者等ステークホルダー：最終的な技術の選択。将来性のある技術に対して早期の段階から開発に関与。
    - JAEA：多様な技術開発に対応可能な研究開発基盤の維持・発展。設計手法や安全基準等の国際標準化。
    - メーカー：創意工夫を活かした技術開発を推進。

今後の開発方針(3/3)

「戦略ロードマップ」（2018年12月21日　原子力関係閣僚会議決定）

- 今後の開発の作業計画：フランスや米国等との国際協力を活用し、実用化のための技術基盤の確立とイノベーションの促進に取り組む。
  - ステップ1（競争の促進）：
    - まず当面5年間程度は、民間によるイノベーションの活用による多様な技術間競争を促進する。
  - ステップ2（絞り込み・重点化）：
    - 2024年以降に採用する可能性のある技術の絞り込みを、国、原子力機構、電気事業者がメーカーの協力を得て実施する。
  - ステップ3（今後の開発課題及び工程についての検討）：
    - 関係者の理解が共通化されたタイミングで工程を検討する。

原子力イノベーション　原子力小委員会資料（2019年4月）より

まとめ：原子力のイノベーション創出に向けた課題と取組の方向性

①技術開発の方向性の共有ステークホルダーとの対話	②技術開発支援	③研究基盤の提供	④人材育成	⑤規制との対話
・国、開発主体、ユーザー等、各主体間での連携が不十分	・これまで画一的かつ硬直的な支援を実施	・民間による技術開発において、JAEAのリソースの活用が十分でない	・関係者間や多分野との連携が不十分 ・薄く広く様々な取組を支援	・民間主体の開発の促進のためには、規制との対話が不可欠
● 政府はエネルギー基本計画等を通して、原子力政策全体の方向性を提示。 **● 技術開発の方向性や、ユーザー（電気事業者等）のニーズなどの多様な認識を、関係者間で議論・共有し、認識の共有化を図る。**	**● 技術の成熟度や開発主体に応じた、きめ細かい支援策を講じ、多様な技術開発を推進する。** **● ユーザー（電気事業者等）の視点も取り入れた適切な評価・絞り込みを実施する。**	**● JAEAが産業界・大学・海外等を繋ぐハブの役割を果たし、多様な技術開発に設備・知見を提供。** **● 原子力に限定しない多様な分野の知見を取り入れ。**	**● 他組織・他分野との融合や国際協力を通じて、人材育成の拠点を形成。** **● 育成プランの修正・統合を進め、効果的な人材育成を実施。**	**● 今後の規制との対話のあり方について検討。**

➢ 開発に関与する主体が有機的に連携し、基礎研究から実用化に至るまで連続的にイノベーションを促進していくことが必要 ⇒ **NEXIP(Nuclear Energy × Innovation Promotion)イニシアチブ**

原子力イノベーション　原子力小委員会資料（2019年4月）より

③研究基盤の提供

＜具体的な研究基盤提供の考え方＞

民間企業による多様な技術開発を促進

◆原子力イノベーション創出に向けた平成３１年度予算事業を活用

→多様化する社会課題（安全性の向上、再エネとの共存、多目的利用（水素製造等）等）に対応した様々な技術の可能性を追求。

民間企業の開発促進

企業連携

国際協力

etc.

●海外の原子力研究機関との施設相互利用を促進し、研究開発を効果的・効率的に実施。

●多国間協力による基盤的データの整備を進め、協力枠組みの中での研究開発の効率化を図る。

基盤整備を効率化

ＪＡＥＡのミッション：国内の技術基盤を維持・発展

①過去の知見・知財のデータベース化

●これまでに得られた知見・知財等を将来世代がアクセス・利用できるように整備するとともに、民間企業へ提供。

●ＤＢの整備で明らかになった「知識の穴」を国際的な協力も得つつ、埋めていく。（質の高い知見・知財の整備）

②試験研究施設の整備

●民間企業の開発を支える研究施設を整備するとともに、技術サポートも充実させ、質の高い研究基盤を提供。

●優れた学術提案・実用化の見込みの高い開発用途の利用に重点化。

拡充・充実化

③共通課題に向けた基盤整備

●炉型によらない課題に対応するための評価・シミュレーションツール（熱流動を解析するコード等）を整備。

●安全基準、構造・材料等の規格基準整備。

④安全性・経済性向上に係る技術開発

●自然循環による除熱や、炉心損傷事故対策など高速炉の安全性を向上させる技術開発

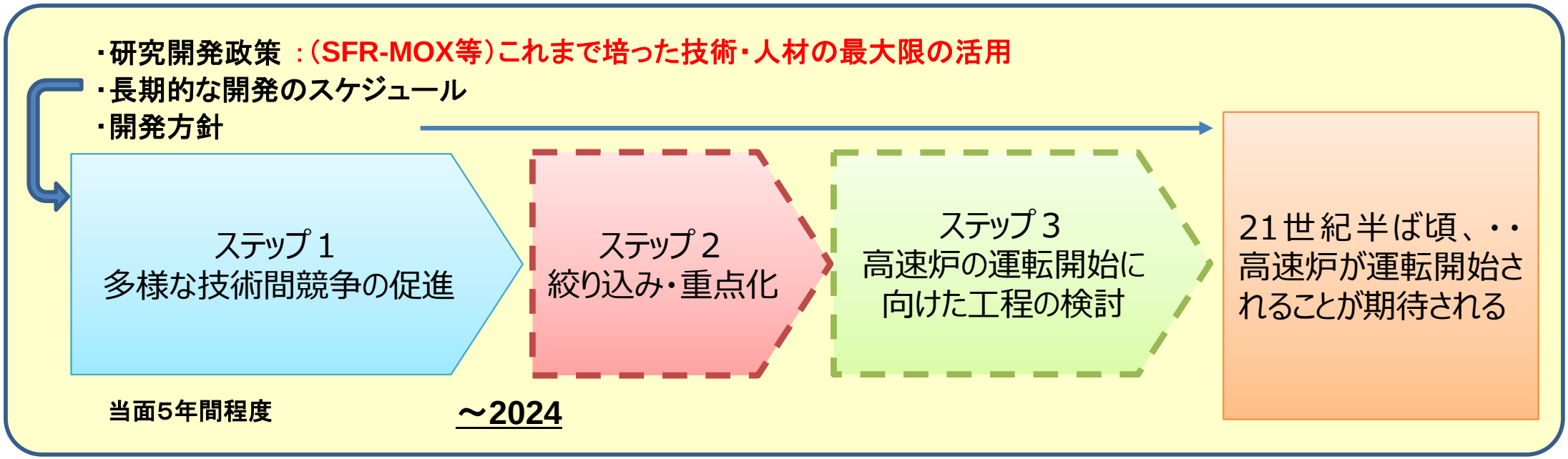
●経済性向上技術開発。

NEXIPイニシアチブ（Nuclear Energy x Innovation Promotion）

2019年度、経済産業省は実用化段階にある原子力について多様な選択肢追及の一環として技術開発を促進し、民間の創意を活かしたイノベーションを実現することを目的とし、NEXIPイニシアチブを開始

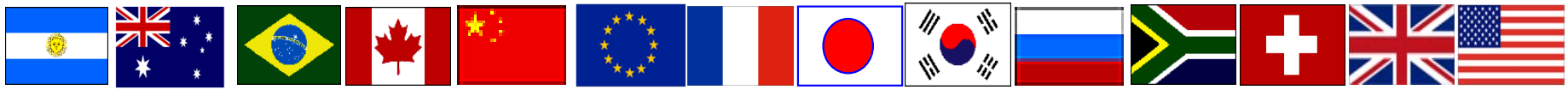
1. 「社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業補助金」（2019年度：6.5億円）
   - 更なる安全性・信頼性の向上、更なる経済性の向上、更なる機動性の向上、エネルギーの多目的利用、廃棄物対策の実現などの社会的要請に応える炉型に関する原子炉技術の調査・研究（フィージビリティスタディ）を支援
   - 必須項目として、安全性・信頼性及び経済性に関する達成目標を示した上で、任意項目として、機動性、エネルギーの多目的利用、持続可能性、放射性廃棄 物対策など、その他の課題に関する達成目標を、最低1つ以上要求
2. 「原子力の安全性向上に資する技術開発費補助金」（2019年度：6億円）
   - 原子力のより高い安全性を実現することを目的として、実用発電用原子炉（軽水炉）の安全対策高度化のための技術の調査・研究を支援

NEXIPイニシアチブ（Nuclear Energy x Innovation Promotion）

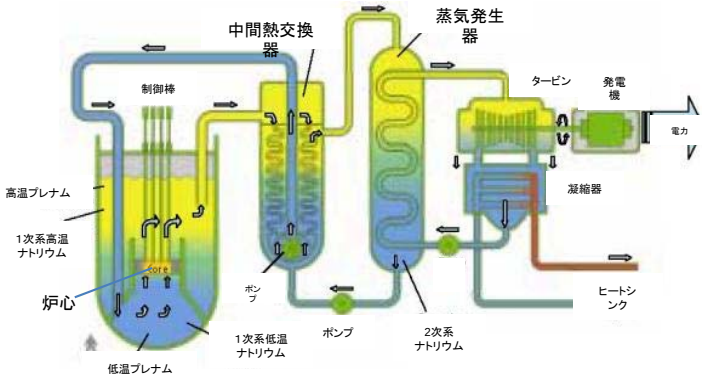


- 2020年度以降、適宜絞り込み

多様なGEN-IV概念（GIF）

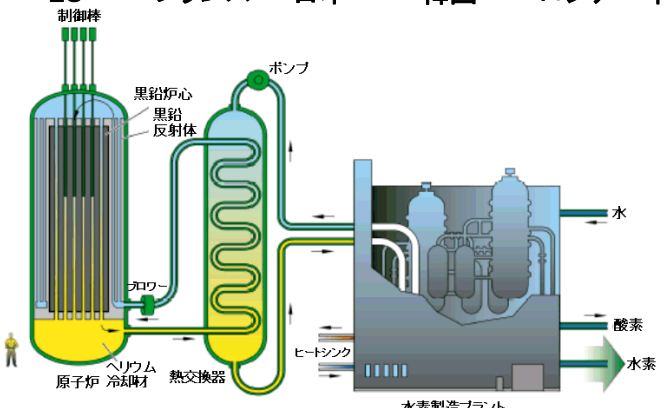


アルゼンチン　オーストラリア　ブラジル　カナダ　中国　EU　フランス　日本　韓国　ロシア　南アフリカ　スイス　英国　米国



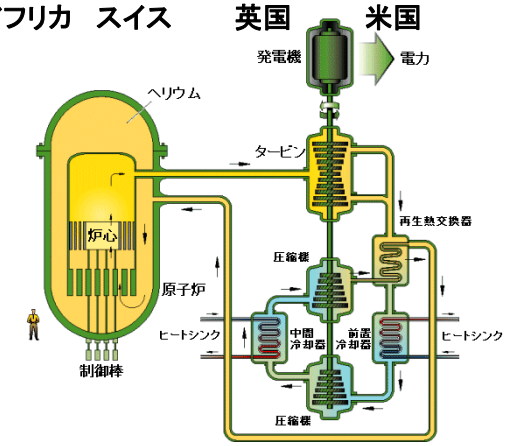
ナトリウム冷却高速炉（SFR）

- 技術的に最も成熟。経済性の向上が課題。



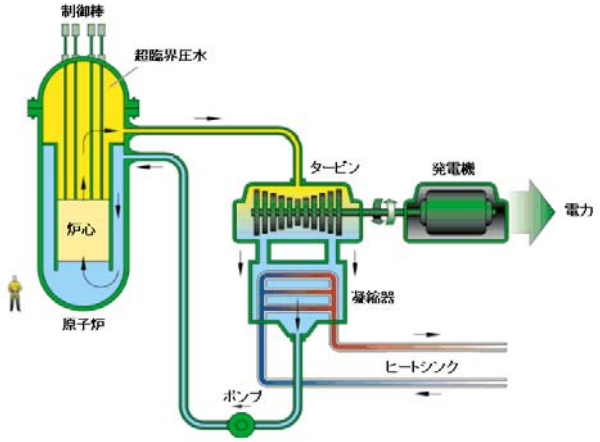
超高温ガス炉（VHTR）

- 高温ガス（900～1000℃）の産業利用。燃料再処理ができない。



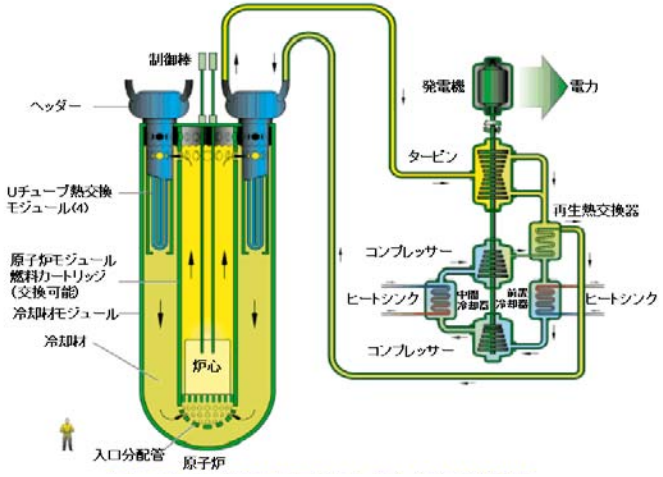
ガス冷却高速炉（GFR）

- 化学的に安定なヘリウムガスを採用。燃料開発が課題。



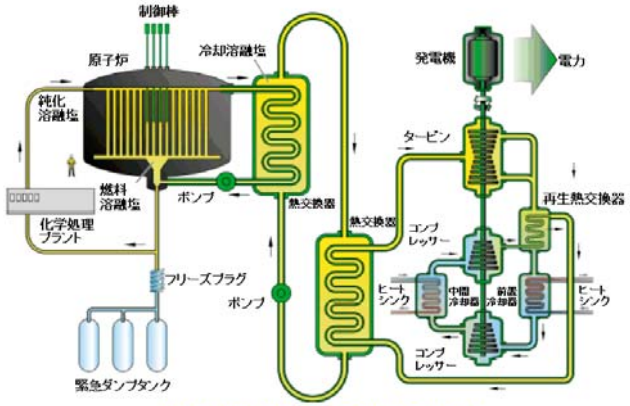
超臨界水冷却炉（SCWR）

- 超臨界水（374℃、22.1MPa以上）を採用。材料腐食が課題。



鉛冷却高速炉（LFR）

- 化学的に安定な鉛を採用。材料腐食が課題。



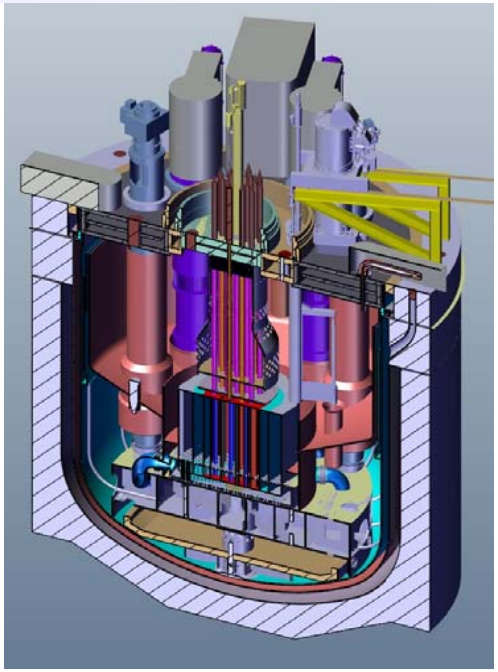
溶融塩炉（MSR）

- 液体燃料を使用する熱中性子炉と固体燃料を使用する高速炉概念がある。材料腐食が課題。

ASTRID開発協力（設計・R&D）

■ 仏国技術実証炉ASTRIDの概要

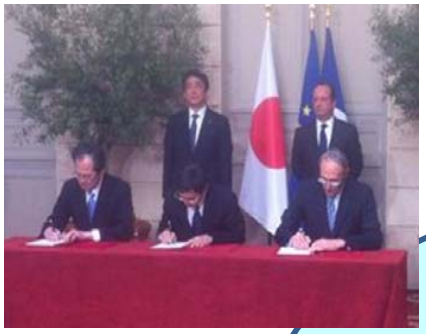
- 2008年:ナトリウム冷却高速炉(SFR)をレファレンス炉に選定
- 2012年:プロトタイプ炉(ASTRID:技術実証炉)の技術仕様を決定
- 2013～2015年：概念設計、2016～2019年：基本設計
- 2060年以降：実証炉建設
- 21世紀後半：商用炉建設



ASTRID概念
（60万kWe、MOX燃料）

■ 協力の概要

- ASTRID開発プロジェクトへの参加は**日仏首脳同士の合意事項。**2014年5月に政府間の取決めを締結。
- **JAEAが日本代表・MFBR/MHIが参加して推進。** 2014年8月に、仏CEA・AREVAと実施機関間取決めを締結（2019年末まで）。



政府間取決め締結

設計分野(11課題)

設計

○強制循環方式崩壊熱除去系2014~
○キュリー点電磁石方式自己作動型炉停止機構2014~
○免震技術2014~
○炉上部機構2016~　○原子炉容器室上蓋2016~
○コアキャッチャー2016~　○プラント伝熱流動挙動2016~
○炉容器等の構造健全性2016~　○全般議論2016~

日仏共同チーム

研究開発

燃料分野(8課題)2014~
燃料照射試験
Phenix燃料照射後試験
長寿命制御要素開発
燃料材料開発、等

SA分野(9課題) 2014~
シナリオ検討
評価手法開発
レベル2PSA
IGRプログラム、等

炉技術分野(11課題) 2014~
材料のクリープ挙動
計装・機器開発
熱流動評価手法開発
実証試験計画、等

2020年からの日仏R&D協力

2019年6月26日、日本・フランス間の高速炉開発協力に関する一般取り決めを締結（経済産業省・文部科学省－フランス原子力代替エネルギー庁）

- 目的・原則
  - 高速炉協力に関するシミュレーションと実験に基づく研究開発を実施するための枠組 みを定める。
  - 公平、互恵、双方による応分の貢献の原則に基づき協力を行う。
- 協力の実施期間
  - 本取り決めは、署名の日から効力を持ち、2024年12月31日まで効力を有する。有効期間は双方の合意により延長することができる

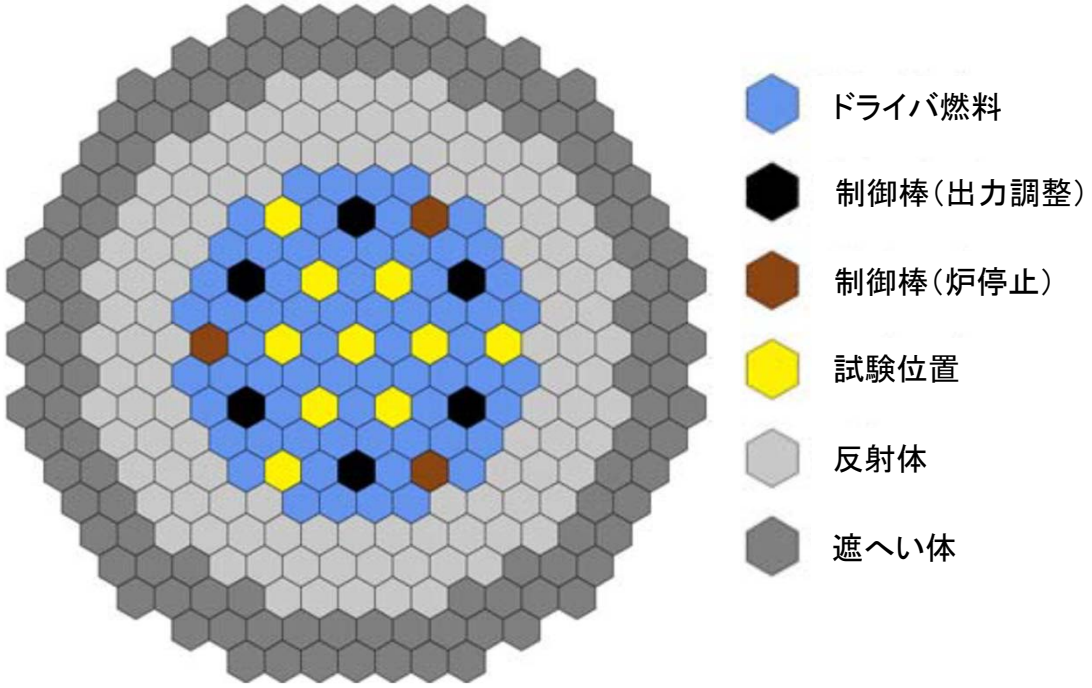
2020年12月3日、日本・フランス間のナトリウム冷却高速炉開発協力に関する実施取り決めを締結（JAEA・MHI・MFBR－フランス原子力代替エネルギー庁・FRAMATOME）

- 協力項目
  - シビアアクシデント／化学リスク／構造材料／炉心材料／燃料技術／検査・計装／数値シミュレーションツール／プラント機器開発／試験施設／安全／新型構造の11分野について、R&D協力を実施

米国とのVTR協力

VTR（Versatile Test Reactor）協力が日米で検討されている

- 協力範囲
  - 原子炉設計と安全解析
  - 実験・試験施設の設計
  - 原子炉や実験の計測制御
  - 燃料/被覆管材料
  - モデリングとシミュレーション/検証



VTRの炉心配置（リファレンス）

出典 Florent Heidet, et. Al., Overview of the Versatile Test Reactor Core Design, ANS Annual Meeting 2019, MN, USA

高速炉の実用化ステップ

高速実験炉「常陽」

- 燃料増殖性や安全特性の実証
- 保守補修に関する知見の蓄積　等

高速増殖原型炉「もんじゅ」（28万kW）

- 発電プラントとしての信頼性の実証
- ナトリウム取扱技術の確立

先進的な燃料技術の基礎的な開発　等

高速炉サイクル実用化戦略研究

1999年　FS　2005年

高速炉サイクル実用化研究開発

21世紀半ば頃

次期炉

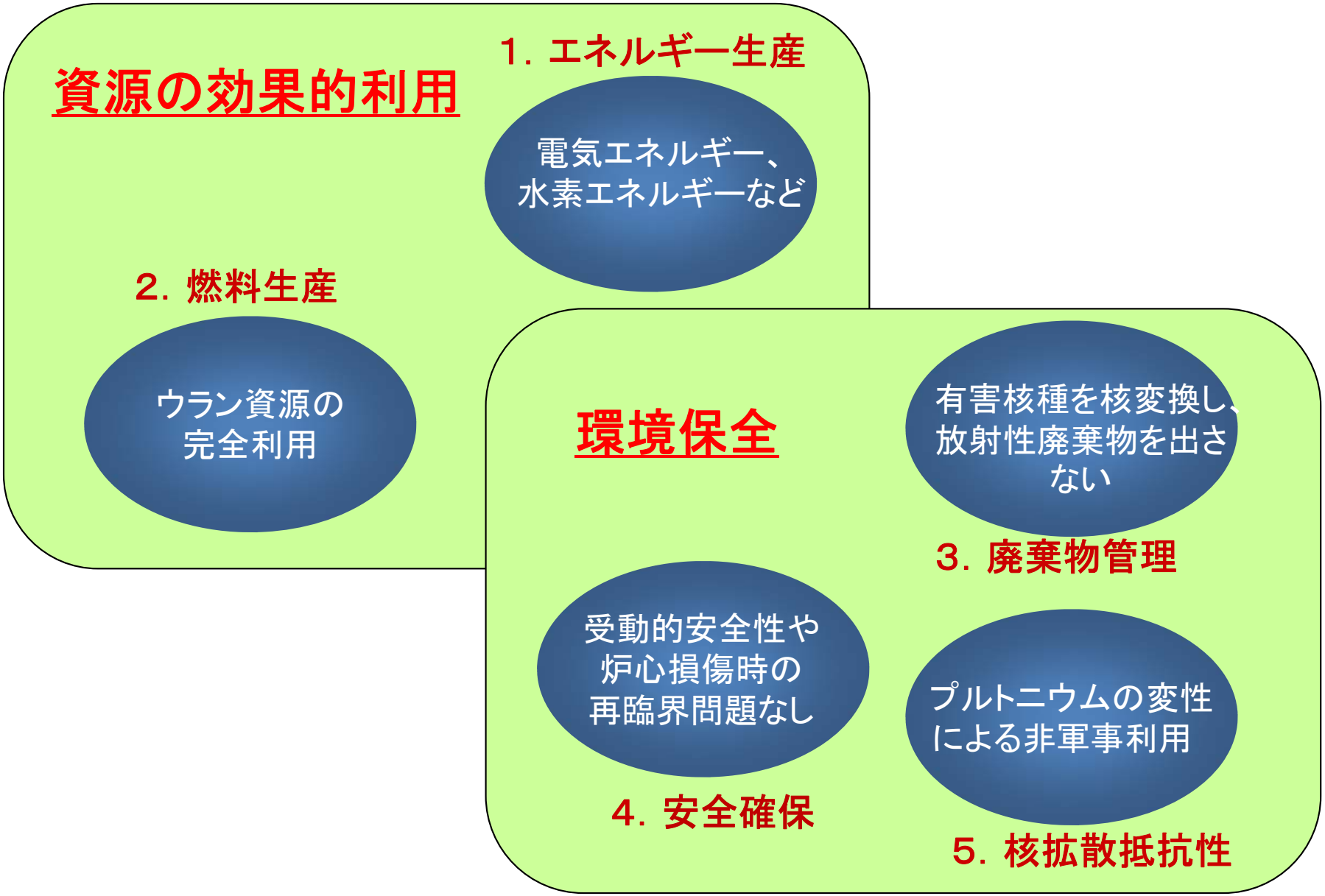
- 実用炉の経済性の見通し
- 技術的諸性能の実証

21世紀後半

実用炉

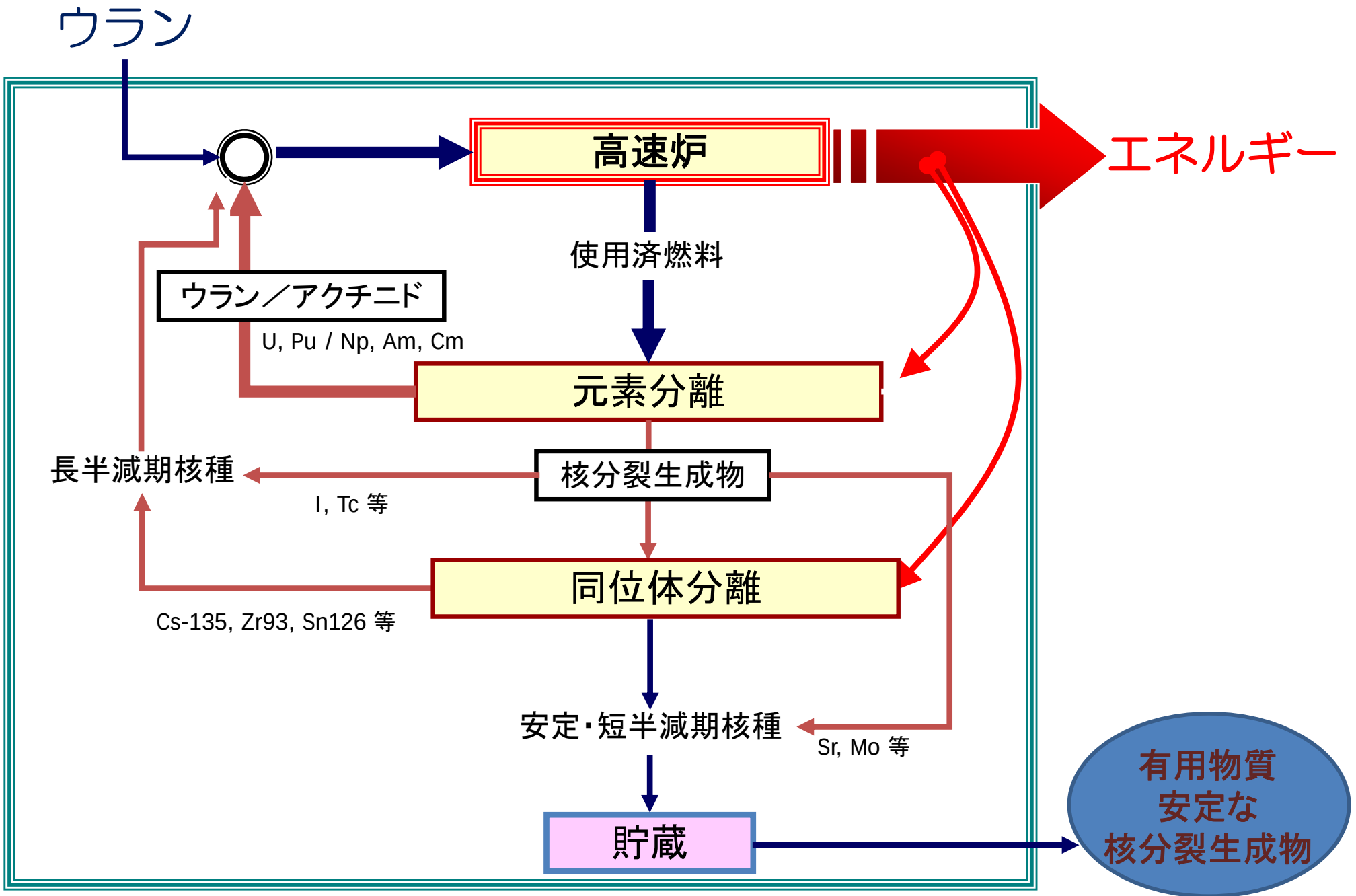
高速炉による核変換について

５つの機能を同時に達成できる原子力システム



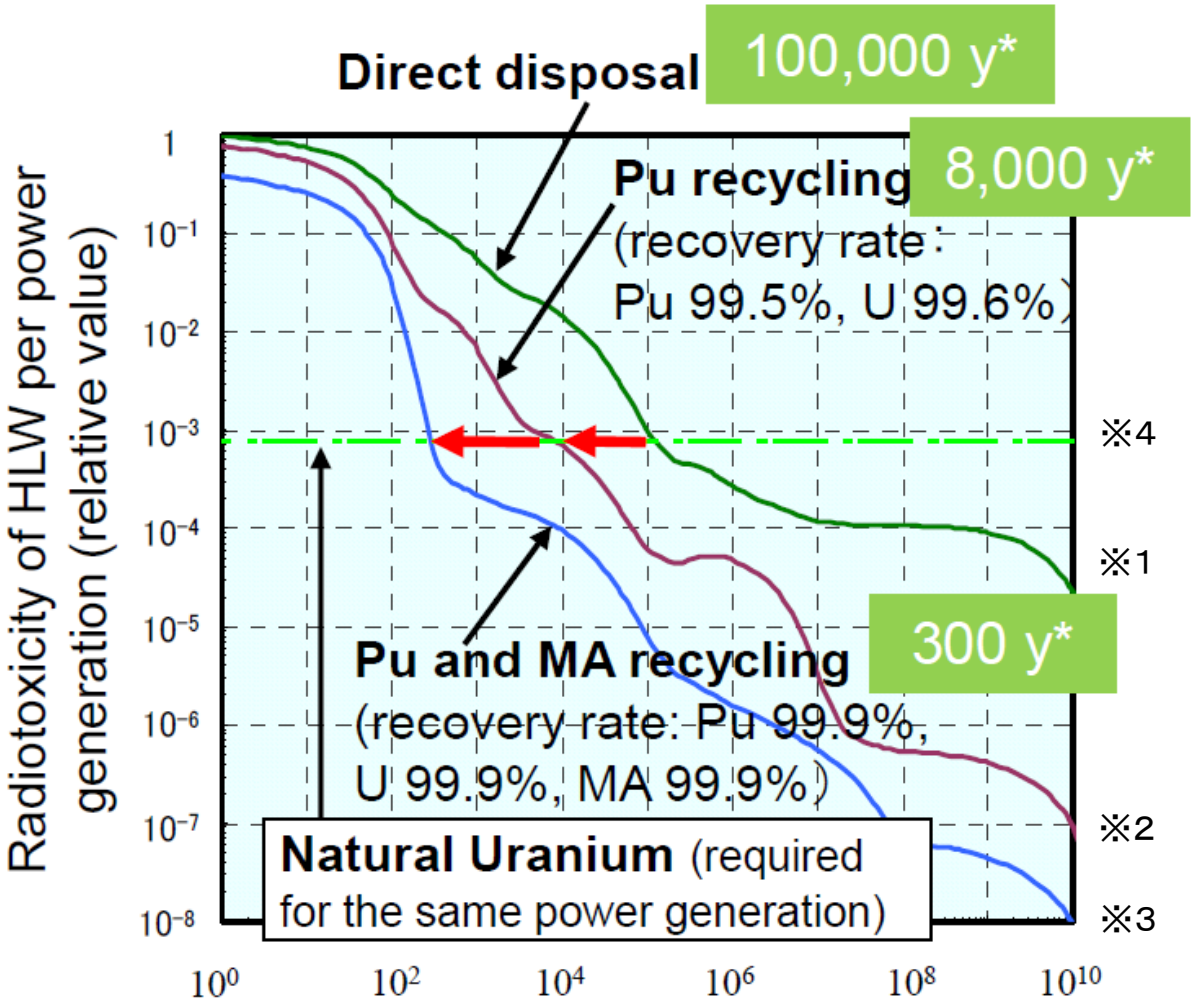
出典：　藤家洋一　講演集

自ら整合性のある原子力システム



出典：　藤家洋一　講演集

核変換の効果：潜在的な有害度



高レベル放射性廃棄物の毒性低減効果

（天然ウランレベルまで減少するのに要する時間）

※1：ワンスルーで100万kWe軽水炉を1年間運転した結果生じる使用済核燃料（直接処分）を経口摂取した場合の被ばく値。高レベル放射性廃棄物と人間との間には障壁があるため、高レベル放射性廃棄物の実際の危険性ではなく、潜在的な有害度を示している。

※2：U, Pu リサイクルで100万kWe軽水炉を1年間運転した結果生じる使用済核燃料を再処理した高レベル廃棄物を経口摂取した場合の被ばく値（※1の1年目の値を1とした相対値）。

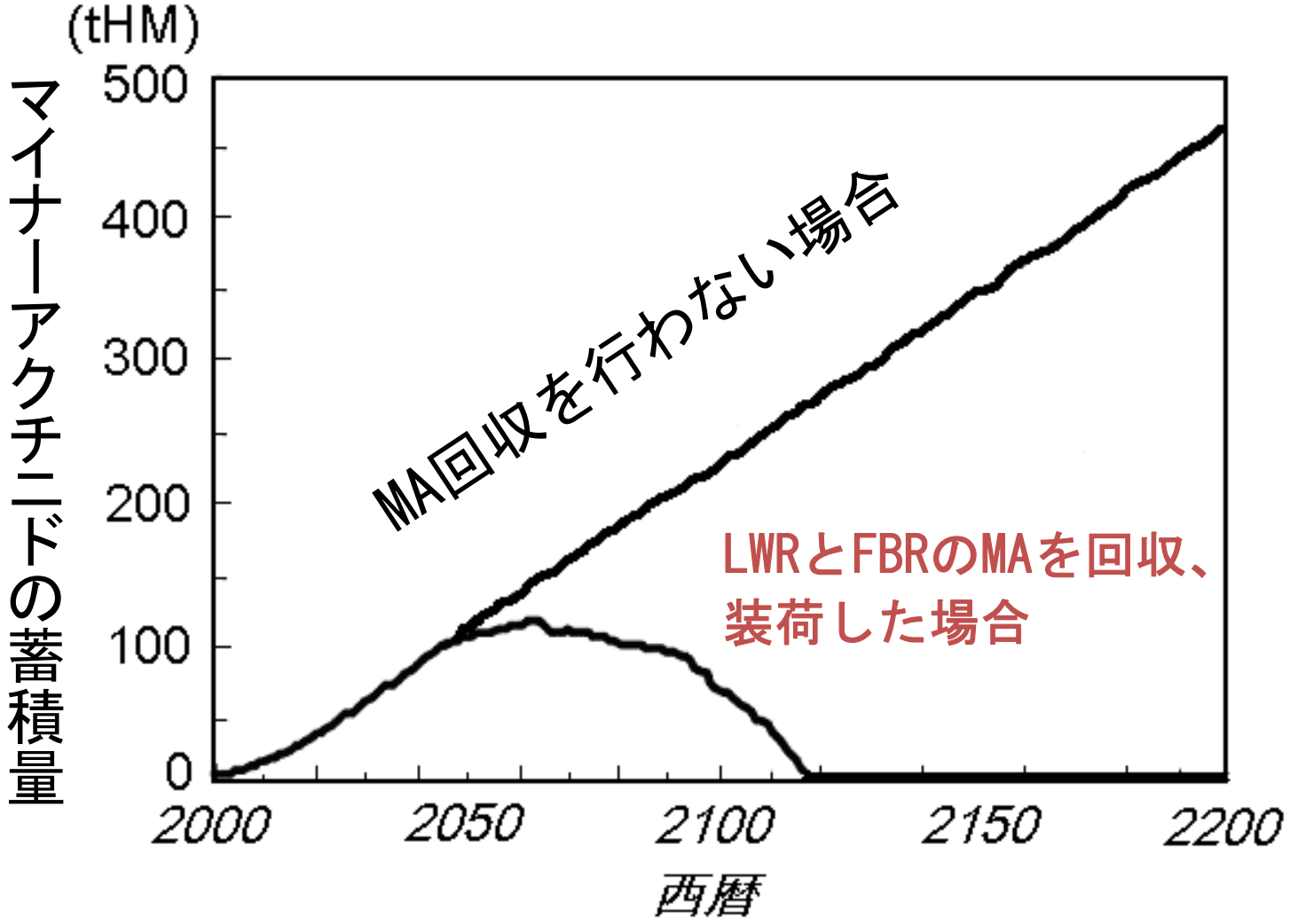
※3：U, Pu ,MAリサイクルで、100万kWe高速炉を1年間運転した結果生じる使用済核燃料を再処理した高レベル廃棄物を経口摂取した場合の被ばく値（※1の1年目の値を1とした相対値）。

※4：100万kWe 軽水炉を1年間運転するために必要な天然ウランを経口摂取した場合の被ばく値（経時変化を評価した最大値）。

■ 放射性廃棄物の放射性毒性は、直接処分の場合10万年を要するところ、Pu及びMAをリサイクルすることで300年に大幅に短縮できる。

出典：「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会編, 分離変換技術総論, 日本原子力学会, 2016

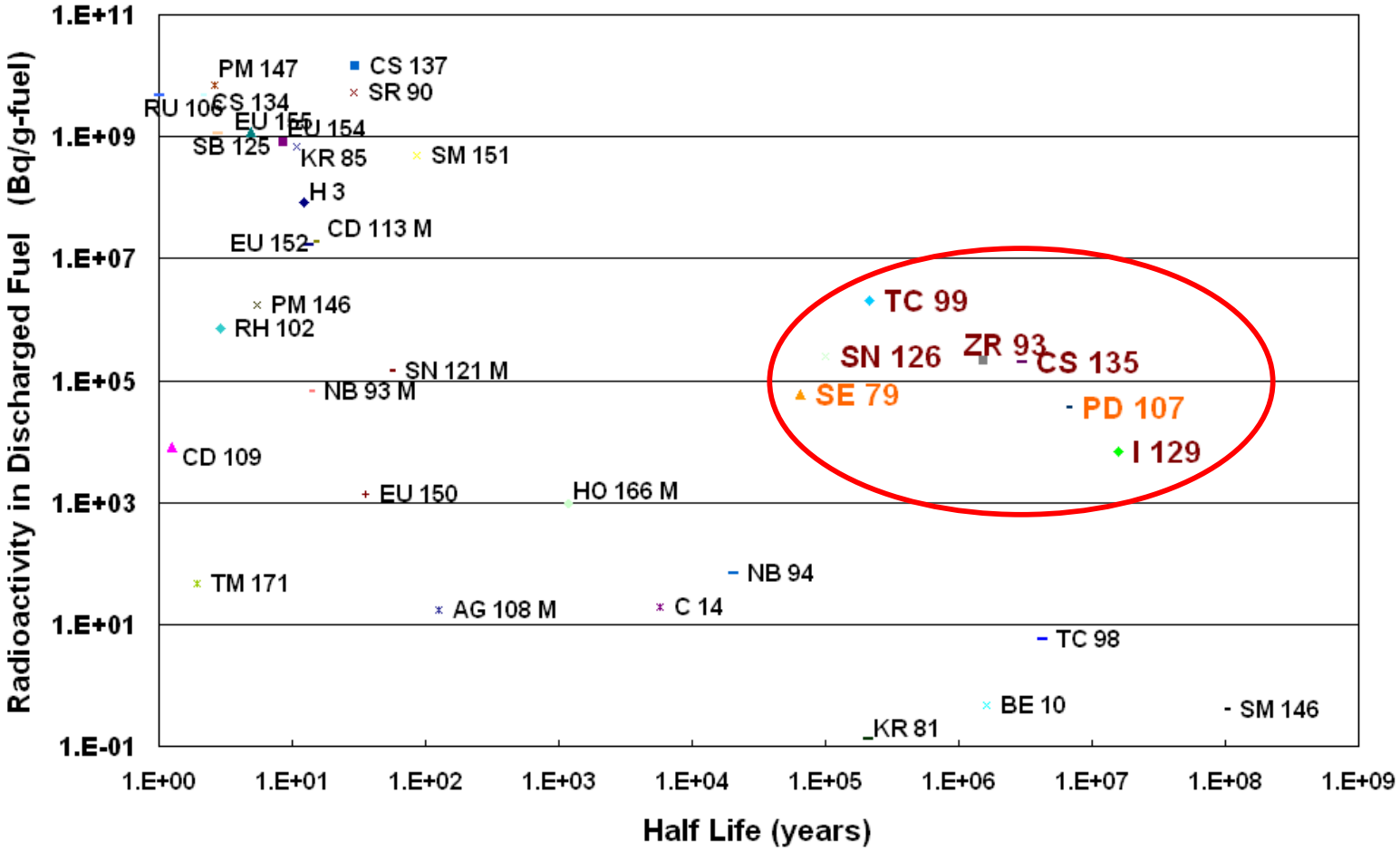
MOX燃料FBRでのMA燃焼能力



MOX燃料FBR炉心は、2050年からFBR導入を開始し、約3.5%MA含有率の燃料を装荷することで、燃焼・消滅可能な能力を持つ

出典:「高速増殖炉サイクルの特性評価」サイクル機構技報No.12別冊*2001.9*

長寿命核分裂生成物（LLFP）



長寿命の核分裂生成物(I-129, Pd-107, Cs-135, Zr-93, Tc-99, Sn-126, Se-79)の内、Pd-107は生成量が少なく(0.3kg*)水への溶解度も低い、Se-79 は生成量が桁違いに少ない(0.006kg*)　　*使用済み燃料1トン当たりの含有量

→ I-129, Cs-135, Zr-93, Tc-99, Sn-126 が核変換の対象

出典：藤家洋一　講演集

核変換技術の開発対象核種

目的	潜在的放射能低減		地層処分の観点		有効利用	
	放射能の低減	放射性毒性の低減	処分場の被ばくリスク低減	処分場面積等の削減	触媒他化学利用	放射化学的利用（熱源、放射線源）
対象元素	U, Pu, Np, Am, Cm Tc	U, Pu, Np, Am, Cm	I	[発熱源] Am※, Sr, Cs [固化体への影響] Mo	Pd, Tc	Cs, Sr
手段	分離・核変換			分離のみ		

※　Amについては分離・核変換の対象。

当面の開発対象として、現在の技術及びその延長上で可能性が見通せる以下の核種を選定。

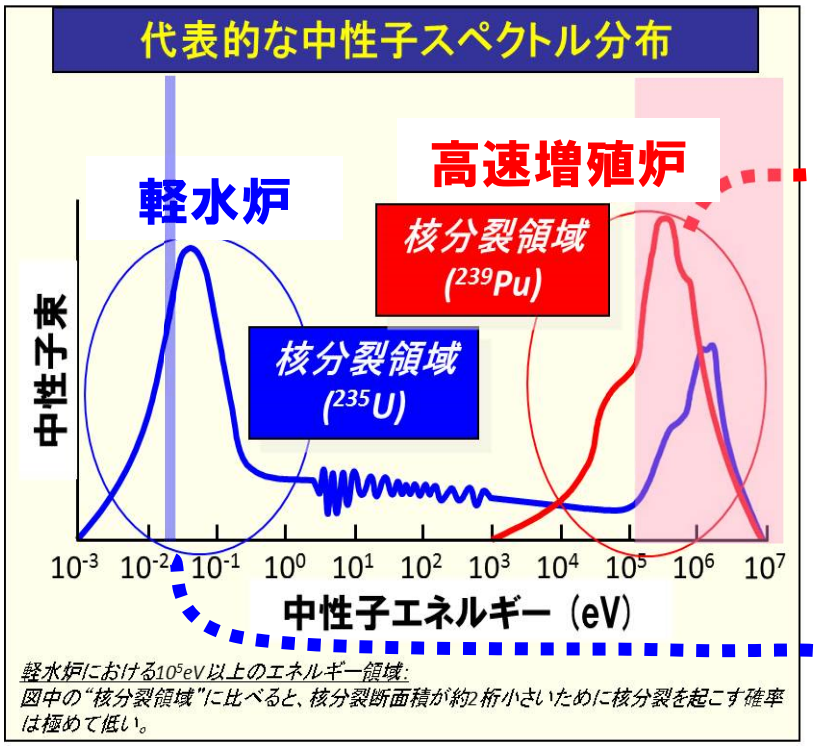
- 放射性毒性の観点ではTRU核種が主要核種となる。
- 放射能の観点ではさらにTcが加わる。
- 処分場の被ばくリスク低減の観点ではI-129が主要核種となる。

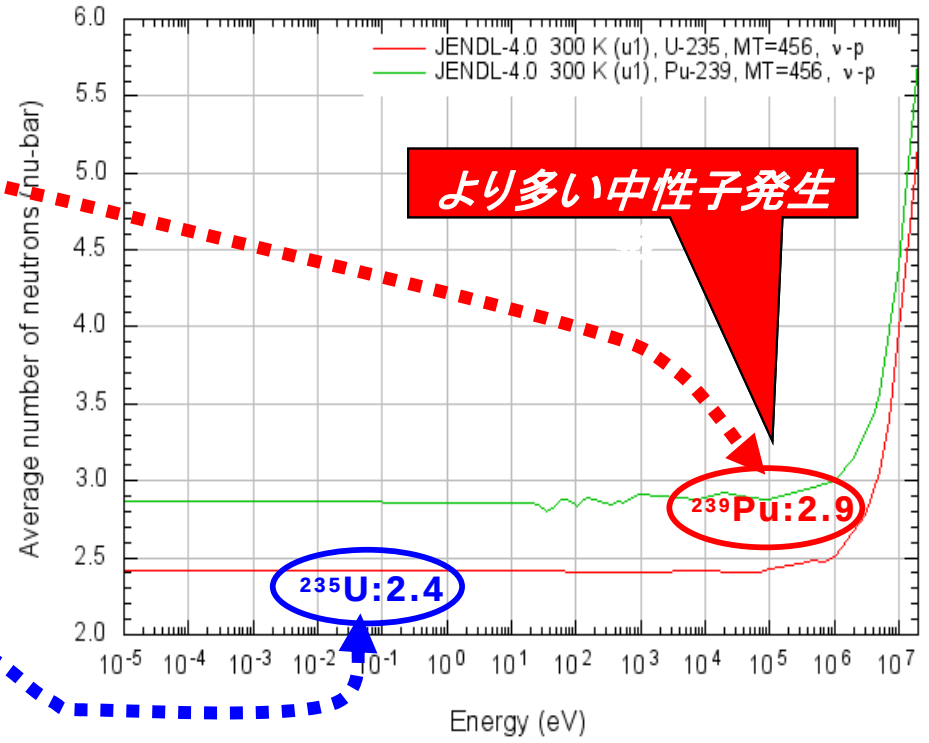
出典：　JNC TN9410 2003-001　分離核変換技術開発基本計画

核変換に対する高速炉の適用性(1/2)

■ 1核分裂当たりの放出中性子数（ν 値）が多い
燃料物質にPuを用いる高速炉では、より多くの中性子を利用できる（余剰中性子が多い）。

ν 値：1核分裂あたりに発生する中性子数

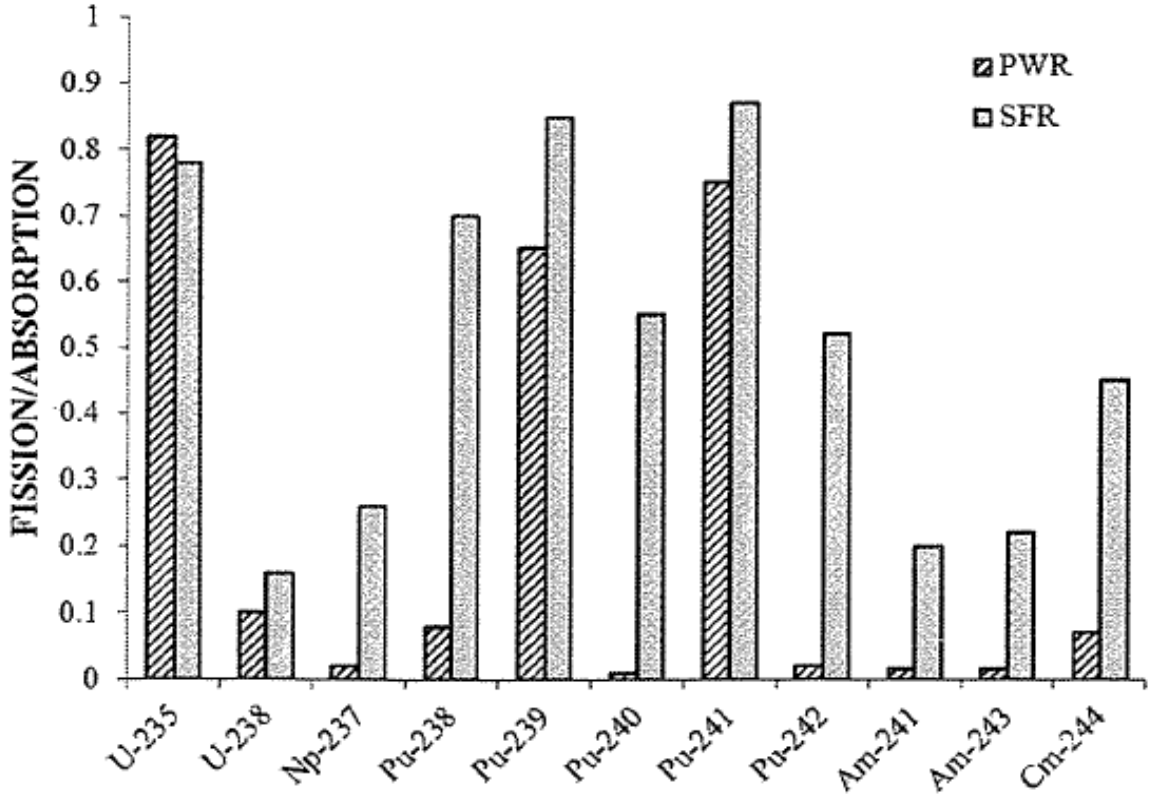




（独）日本原子力研究開発機構 次世代高速炉サイクル研究開発センター宇都成昭氏提供

核変換に対する高速炉の適用性（2/2）

■ 中性子吸収当たりの核分裂の確率が高い（核分裂／吸収断面積比が大きい）
特に親物質は閾値を持った核分裂反応を起こし、かつ中性子捕獲が小さく、質量数の多い核種に変化しにくい（高次化しにくい）。



主な燃料核種の核分裂／吸収断面積比

出典　A. E. Waltar, D. R. Todd and P. V. Tsvetkow, “Fast Spectrum Reactors,” (2012)

高速炉サイクルにおけるMA、LLFP核変換の概念

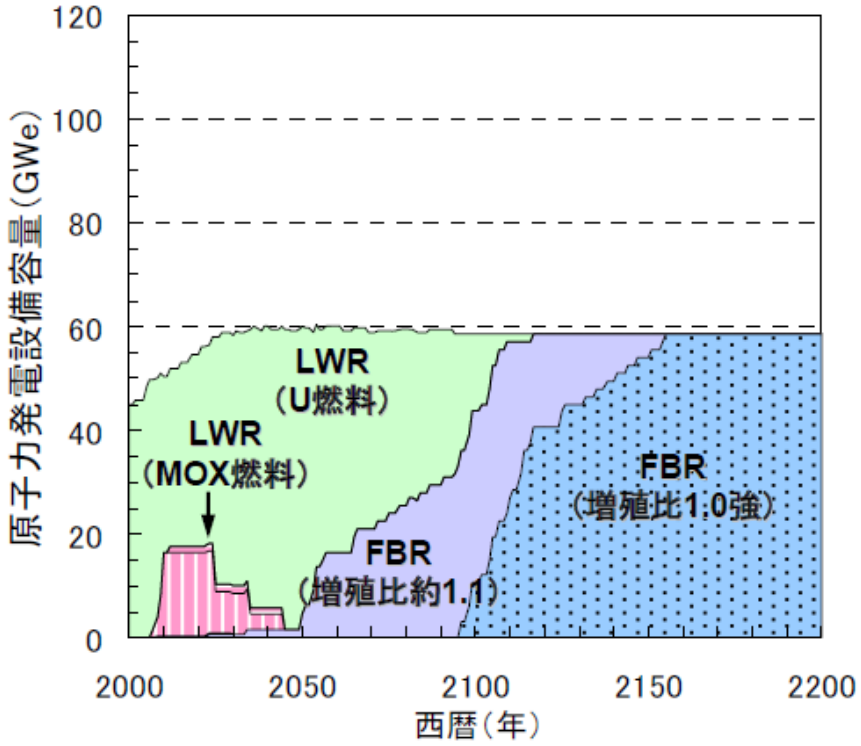
■ 基本的な考え方

発電やPu増殖といった高速炉の本来の役割や性能を維持しつつ、PuとMAを分離せずTRUとしてMOX燃料に使用し、高速炉サイクルにてリサイクルする（均質リサイクル）。LLFPについては、長期的な導入を目指し研究開発を進める。

■ 高速炉の導入シナリオ（例）

軽水炉と同程度の電気出力150万kWeの高速増殖炉を導入し、軽水炉をリプレースしながら積極的にPuを増殖する（増殖比約1.1）。

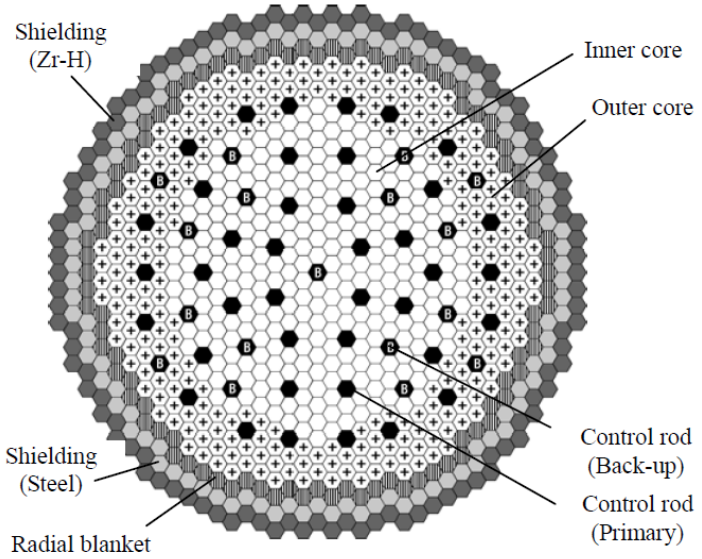
導入が進み平衡状態となった後は、増殖比を下げた炉心を導入し、Puを余剰に保有しないようにする（増殖比1.0強）



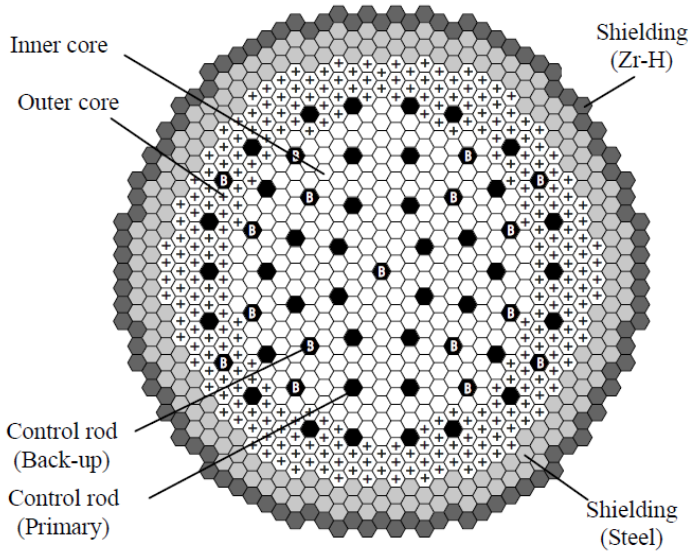
高速増殖炉の導入シナリオの一例

出典　大滝明, 小野清, 他：“FBR サイクルの多面的評価(4) －FBR サイクル候補概念の導入シナリオ評価－”, 原子力学会「2006 年春の年会」E32

高速炉サイクルにおける炉心の概要（設計例）



導入期炉心の配置（増殖比：1.1）



平衡期炉心の配置（増殖比：1.03）

炉心の主要仕様

項　目	導入期炉心（増殖比 1.1）	平衡期炉心（増殖比 1.03）
原子炉出力 [MW_e]	1,500	
燃料集合体数（炉心 / 径方向ブランケット）	562 / **96**	562 / **0**
炉心高さ [cm]	100	
軸方向ブランケット厚さ [cm]（上部 / 下部）	**20** / 20	**15** / 20
被覆管外径 / 肉厚 [mm]	10.4 / 0.71	
集合体当たりピン本数	271	
取出平均燃焼度 [GWd/t]（炉心 / 炉心+ブランケット）	約150 / 約**89**	約150 / 約**115**
運転サイクル長さ	18～26ヶ月	

- 増殖比：1.1～1.0※
  炉心配置は同じで、上部軸方向ブランケット厚さの変更（20cm⇒15cm）及び径方向ブランケットをしゃへい体へ置き換えることで平衡期炉心へ移行可能。
- 高い経済性
  炉心取出平均燃焼度は15万MWd/t、運転サイクル長さ18～26ヶ月。
- MA含有率
  導入期炉心では3%程度以下。平衡期炉心では1%程度。

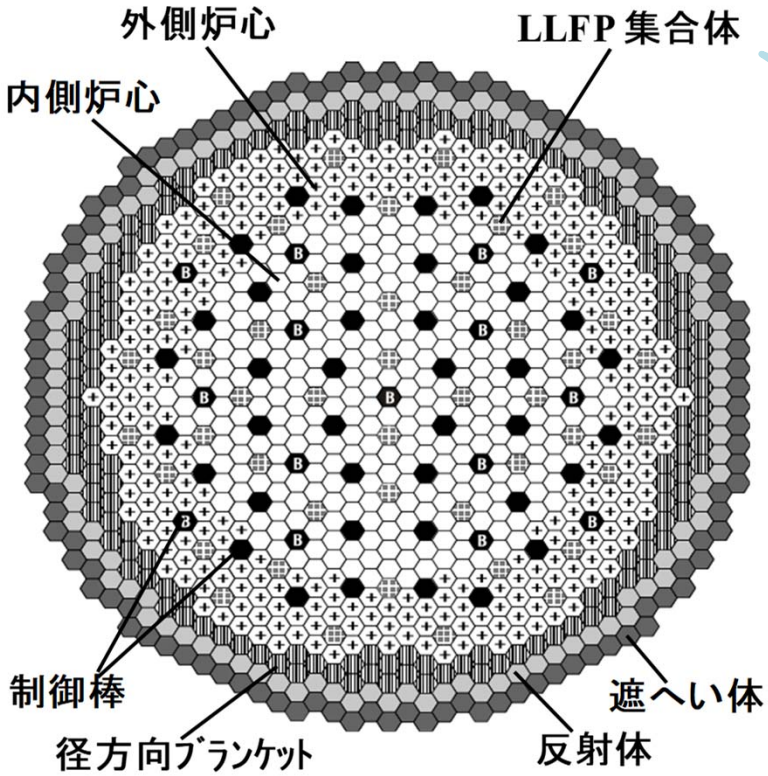
※　軸ブランケットを厚くすることで増殖比1.2も可能。炉心径や燃料集合体サイズを変えない場合は炉心高さを下げる必要があり、それにより増加する線出力を緩和するためにピン本数を増やす必要がある。結果としてピン径が細くなり、装荷できる燃料が減り、運転サイクル長さが短くなる。

Okubo, et al.,: “Conceptual Design for a Large-Scale Japan Sodium-Cooled Fast Reactor (3) Core Design in JSFR”, Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plant 2011 (ICAPP11), Nice, France, Paper 11345(2011).

LLFP核変換に関する炉心概念

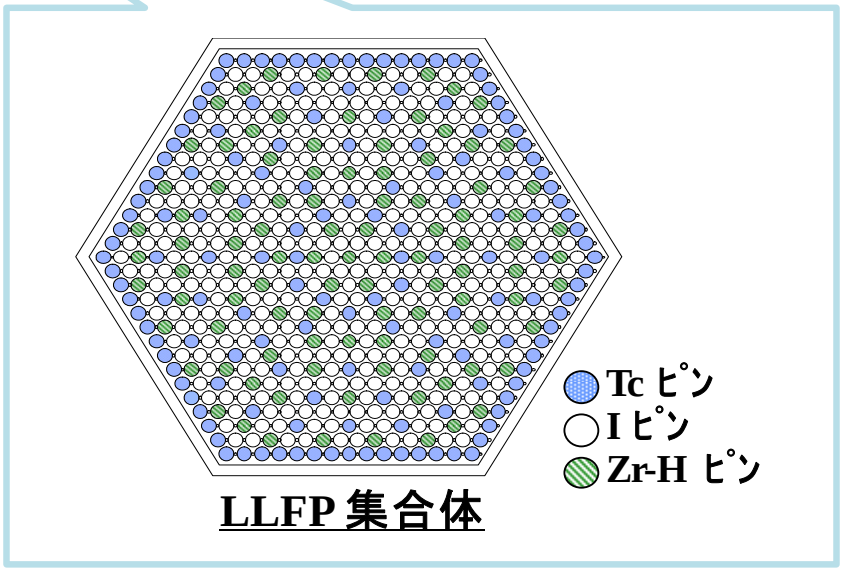
■ 設計例として、Zr-Hを減速材として含んだLLFPターゲット集合体*を炉内に装荷し、増殖モードの炉心の性能（燃焼度や増殖比）は維持しつつLLFPを核変換する概念を検討。

⇒炉心で生成する分と同程度のLLFPを変換することができ、LLFPの蓄積を抑制することができる見通し。



LLFPターゲット集合体を含んだ
150万kWe 増殖炉心

*減速材割合は15%程度。割合を増やすと隣接集合体の出力ピークが問題となる。

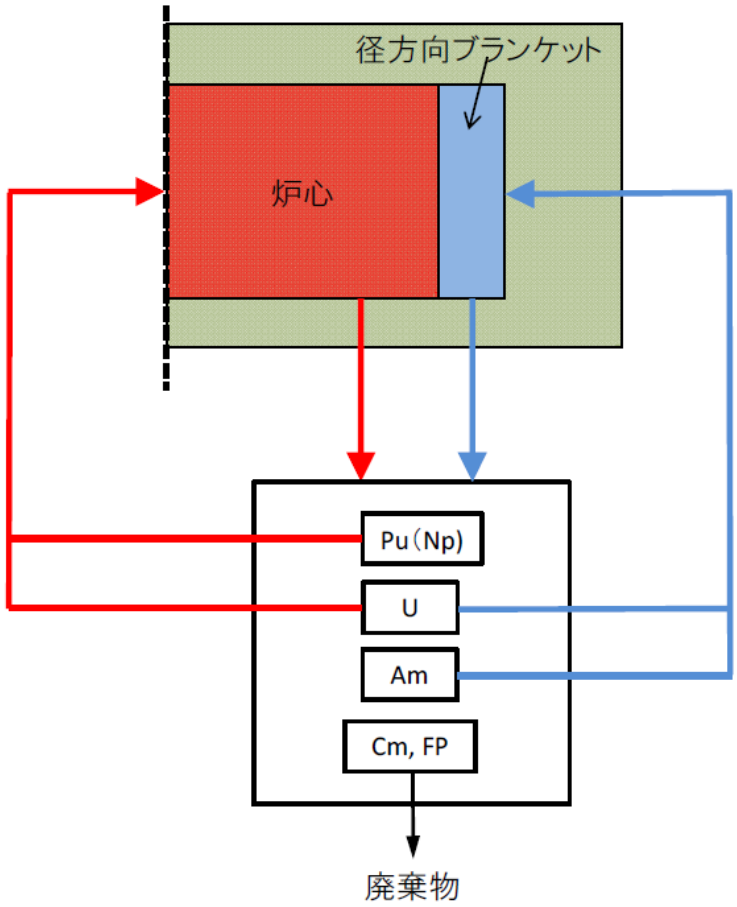


出典　Naganuma, et al.,: “Conceptual Design Study of LLFP Transmutation Fast Reactor Cores in the ″Feasibility Study″ in Japan”, Proceedings of GLOBAL 2005, Tsukuba, Japan, Paper 439(2005).

海外（フランス）の核変換の概念

- 処分場面積の削減に効果のあるAm（含Am-241）を炉心外周部に装荷する非均質リサイクルを採用。
- MA核変換の開発の優先度は低い。LLFP核変換は対象外。

日本の場合は、Np、Am、Cmを炉心に均質に装荷する（均質リサイクル）。



MAの非均質リサイクルの概念図

- Cmを分離する技術を採用し、Cm含有によるサイクル全般への工学的不利益（炉心特性悪化、燃料製造や輸送における発熱や放射線の影響等）を避ける。
- 炉心部のAm含有率は1～2%に制限、ブランケットへのAm含有率は10～20%を検討。

- 非均質リサイクルのシステム上の特徴として、発電（やPu増殖）と核変換は分離できるので、開発要素の少ないU、Puリサイクルの確立後にオプション的にMA核変換を行うことが可能（柔軟性がある）。

- Amを多く含む燃料の製造、輸送、取扱い時において発熱や放射線への対策が必要となる。また、Am含有燃料の照射挙動の確認、Cm分離技術など実現に向けて解決すべき課題がある。

出典：「放射性廃棄物の分離変換」研究専門委員会編，分離変換技術総論，日本原子力学会，2016