

新型炉部会セッション

社会動向を踏まえた新型炉開発の価値

Value of Advanced Reactor Development Based on Social Trends

(1) エネルギー安全保障・廃棄物問題解決等へ貢献できる新型炉開発の価値と課題

(1) Values and issues in developing advanced reactors that can contribute to the solution of energy security and radioactive waste issues

*高木 直行¹

¹ 東京都市大学

1. エネルギーを取り巻く状況

世界がクリーンエネルギートランジションの潮流にある中、国際エネルギー機関（IEA）は、あらゆる国が国民の生活や社会経済活動を維持していくために必要十分量のエネルギーを合理的な価格で継続的・安定的に確保するエネルギー安全保障を地球環境保全と両立していく上で、低炭素電源の多様性確保や鉱物資源のサプライチェーンのレジリエンス強化等の原則を提示している。同時に、これらを推進する上では、各国の事情に応じた多様なアプローチがあり、それを相互に認め協力し合うことを勧告している。また 2022 年 2 月に勃発したロシアによるウクライナ侵攻は、世界規模でエネルギー安定供給への不安や物価高をもたらし、資源調達やエネルギーシステムの在り方について、全体的見直しを迫る状況となっている¹⁾。

そうした中、日本政府は温室効果ガスの排出量削減について、2021 年 4 月の米国主催気候サミットにおいて、2050 年に排出を全体としてゼロにする「カーボンニュートラル」方針と整合的でありかつ野心的な目標として、2030 年度に温室効果ガスを 2013 年度から 46%削減することを目指すこと、さらに 50%の高みに向け挑戦を続けることを表明している。この高い目標の実現に向けては、温室効果ガス排出の 8 割以上を占めるエネルギー分野の取り組みが重要であり、中でも電力部門においては、水素・アンモニアを使った発電や、分離・回収・貯留した CO₂ を化学原料の生産や藻を育成しバイオ燃料として利用する CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage)などの可能性を追求するとともに、再生可能エネルギー（再エネ）や原子力などの実用段階にある脱炭素技術を活用し、着実に脱炭素化を図っていく方針が示されている²⁾。2022 年 6 月下旬には、東京電力管内での電力需給ひっ迫が懸念されたことを受け、岸田総理大臣は冬期に同様な事態が生じる事を避けるため、萩生田経済産業大臣に対し、最大 9 基の原発の稼働を進め日本全体の電力消費量のおよそ 1 割に相当する電力を確保することを指示した。ウクライナ侵攻もあり、エネルギー危機への不安はより現実味を帯びている。

このような背景を受けて、経済産業省資源エネルギー庁は 2022 年 4 月、原子力発電の新たな社会的価値を再定義し、我が国の炉型開発に係る道筋を示すため、総合エネルギー調査会電力・ガス事業分科会 原子力小委員会の下に「革新炉ワーキンググループ」（以下、革新炉 WG）を設置した。2050 年カーボンニュートラル実現に向けては、原子力を含めたあらゆる選択肢を追求することが重要であることに加え、欧米では、既設炉への財政支援等のみならず、革新炉についても大規模予算支援の下にイノベーションが加速していることがその背景にある。この革新炉 WG は 7、8 回の開催を通じて、海外の動向も踏まえながら、原子力イノベーションによる再エネとの共存、水素社会への貢献といった新たな社会デザインを提示するとともに、革新炉を含めた原子力全体のサプライチェーンの維持・強化につなげていくためのロードマップをまとめ、2022 年秋頃にこれを原子力小委員会へ提示することを目的としている。

本稿では、1)近未来の温室効果ガス排出削減の具体的目標に対し、原子力が実効的に貢献するための短中期的計画の在り方、2)我が国のエネルギー安全保障を確保する上での革新炉を含む原子力開発の方向性、3)放射性廃棄物の環境負荷に対する革新炉のポテンシャルについて論じたい。

*Naoyuki Takaki¹

¹Tokyo City University

2. 原子力の短中期の計画の在り方

2022 年 2 月に開催された第 24 回原子力小委員会資料によれば、エネルギー起源の CO₂ を 2030 年時点で 45%削減するための電源構成は、化石火力を 41%に抑え、非化石を 59%とする必要がある。非化石の電源は、再エネが 36~38%、原子力が 20~22%(の組み合わせにより合計 59%)であり、野心的な省エネを想定した 2030 年時点の日本の一次エネルギー供給量(9,340 億 kWh)をこの構成比で供給する計画である。この場合、原子力発電の稼働率を 80%とすると、2030 年時点で必要な原子力発電容量は約 27~30GWe と見積もられる。

図 1 に国内原子力発電所の設備容量推移予想を示す。2012 年の原子炉等規制法改正により、発電用原子炉の運転期間が明示され、使用前検査に合格した日から起算して 40 年運転、1 回に限り 20 年を超えない期間延長できるとされている。運転期間が 40 年のままの場合、2030 年時点での原子力容量は 27GWe であり、CO₂ 45%削減目標達成は辛うじて可能そうだが、それは直ぐさま寿命を迎えた炉の退役により達成不可能となる。2050 年の正味ゼロ目標については、例え全基を 60 年運転としても 2030 年時点での容量維持が出来ず、削減目標の達成が見通せない。

それでは革新炉、新型炉を導入することで削減達成は可能だろうか。図 1 の 40 年運転ケース、60 年運転ケースで若干の違いはあるものの、設備容量の減少速度はおおよそ 1GWe/年であり、これは即ち、2030 年時点の容量を維持するだけでも約 1GWe/年の新規原子炉建設が必要であることを意味する。しかもそれは、40 年運転ケースの場合、2030 年以降早々には開

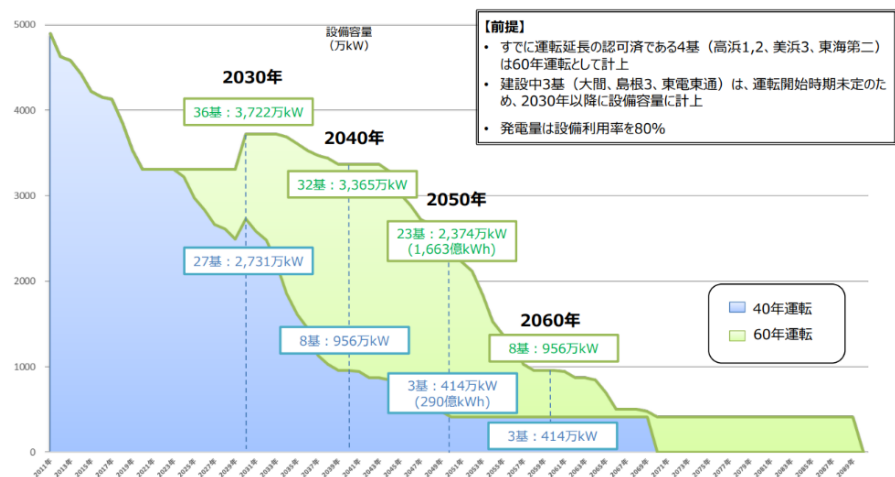


図1 国内原子力発電所の将来の設備容量の見通し¹⁾

始されねばならない。2050 年の正味ゼロ目標達成に至っては、2030 年以降の電力需要伸びや再エネシェアの増加度合いに依存するものの、1GWe/年を上回るペースでの新設炉導入が必要となる。

革新炉 WG で議論の対象とする炉型は、WG のその名称から、SMR や高温ガス炉が想起されることが多い様だが、2030 年運転、1GWe/年以上のペースでの増設を 20 年以上継続、という必要要件を考えると、それらの炉型が適合しにくいことが容易に推察される。例えば米の NuScale 炉 (NuScale Power Module™: NPM) の発電容量は、2018 年にモジュールあたり 50MWe から 60MWe へ、2020 年末にはさらに 77MWe へと増強され、12 モジュールを連結した NuScale 発電所としての設備容量は 924MWe とされているが、仮にこの炉で日本の 2030 年時点の原子力設備容量を 2050 年まで維持するとしたら 260 モジュールもの導入が必要となる。小型かつ自然循環炉は炉心高さ H/直径 D の比が大きめ(≒1.3)であり、定性的に中性子漏洩が大きいことに加え、燃料には HALEU (high-assay low-enriched uranium) でなく濃縮度 5%以下の LEU が想定されているため、取出平均燃焼度は初期型の軽水炉と同等レベルと予想され、天然ウラン消費(次章参照)や使用済み燃料の発生量は大型軽水炉より大きくなる。さらに新型炉の場合、新たな規制基準や体制の整備にも時間を要するであろう。米国が国内向けや輸出目的でこれらを開発する意義と、日本のニーズには隔たりがある。

従って、2030 年に 46%減、2050 年に正味ゼロとする目標に対しては、出力の小さい新型炉よりも、技術が確立し実績豊富、かつ新規規制基準に対応し震災以前に比べ飛躍的に安全性を改善した大型軽水炉の導入が現実的とみるのが自然であろう。もちろん、その大型軽水炉であっても、新規建設が途絶えて久しい日本において上記のスピードで建設導入するには、綻び始めた原子力サプライチェーンの維持・補強が喫緊の課題だ。需要が生まれさえすれば、チェーンの復帰は思いのほか容易、とみるのは楽観的過ぎかも知れないが、日本では 1970 年に始まった軽水炉導入以降、約 40 年で 50GWe の設備を建設した実績がある。東京電力福島第一原子力発電所事故で染みついた軽水炉への不信は、新たに積み上げる実績で払拭するしかない。

3. エネルギー安全保障に貢献する新型炉

1972年にローマクラブが発表した報告書「成長の限界」は、資源、エネルギー、地球汚染、食料生産、人口の総合的相関を示し、地球環境問題対策の重要性を世界へ啓発する役割を果たした。その後、1992年のリオ宣言、1997年京都議定書、2015年パリ協定等を経て、今や気候変動への取り組みの重要性と必要性は各国の共通認識となり、経済活動の方向性をも左右している。この様に地球温暖化への対策が声高に叫ばれる一方で、S+3Eの一つのEであるEnergy Securityへの意識はやや薄れ優先度が低下した、ということはないだろうか。そもそもエネルギー安全保障とは地政学的に捉えられる各国固有の政策を要する問題であり、世界各国が足並み揃えて実施する環境対策とは質が異なるが、こと資源小国日本にとって、その重要性はいささかも変わっていないはずである。ウクライナ侵攻を目の当たりにした全世界は改めてこれを再認識している。

世界人口推移について、国連の最新の報告書は、2022年11月に80億人、2058年には100億人に到達、2080年代には約104億人でピークとなり、2100年までその水準が維持されるとしている。この人口増加と生活の質向上は相乗効果で世界エネルギー消費量を増大させるため、今後高効率化と省エネを極めても消費量の抑制は容易ではない。加えてこのエネルギーの大半を非化石源で供給することが現代の要請である。

IEAが昨年示した「2050年ネットゼロシナリオ」で想定する1次エネルギー供給量は、2020年以降2050年までほぼ同水準の550~600EJ/年とされ、2050年時点で化石シェアを20%まで下げ、残りを再エネと原子力で賄うことでネットゼロを達成可能としている³⁾。この時点での原子力の設備容量は、現在の2倍に近い800GWeにもなっており、これはIAEA「2021年版予測」の高位ケースと同等である。IAEAの低位ケースでも現在レベルの原子力設備容量を2050年まで維持する必要がある。いずれにしても、原子炉を動かすためのウラン資源の消費は継続するということである。

ではここで基本に立ち返り、ウラン資源量の観点から、こうした規模の原子力発電の持続可能期間に目を向けてみる。図2に概算結果を示す。経済的に採掘可能(<100 US\$/lbU₃O₈)なウランの既知資源量は807万tonとされており、このウラン量は、4.5%濃縮度の燃料を用い燃焼度42GWd/tを達成する1GWe大型軽水炉、400基（現在規模、IAEAの低位ケース）を約100年間維持する量に相当する。400GWe分全てがSMRと仮定した場合、燃焼度がやや低いこと、濃縮度の高いHALEUを用いること、熱効率がやや低いことから持続できる期間はほぼ半減する。高温ガス炉(HTGR)では、高い燃焼度や熱効率が得られるものの、濃縮度の高い燃料(14%程度)を用いることから、持続期間はやはり短くなる。設備容量800GWe(IEA ネットゼロ、IAEA 高位ケース)を想定すると、それぞれの期間は半減し、これを究極資源量(1529万ton)で考えるとおよそ倍の年数(図2とほぼ同じ)に延長される。

そもそもワンスルーを前提とした軽水炉のウラン資源利用率(濃縮工程廃品ウラン濃縮度0.25%を想定)は、図3の通り0.5~0.6%程度である。なお、天然ウランで稼働するCANDU炉の燃焼度は軽水炉の1/5程度と低いながら濃縮不要故に資源利用率は1%弱と軽水炉に勝る。一方、近年注目される小型軽水炉や高温ガス炉は、経済性へ直結する燃焼度向上を優先し、資源利用率は0.3%程度に留まる。ここで現在の我が国のウラン購入契約量は、長期契約、短期契約及び製品購入、開発輸入分全てを含め約35万tonであり、大型軽水炉ワンスルーを継続する場合、2070年頃にはこの量を上回る可能性があり、これを回避するには2045年頃からの高速増殖炉導入が必要との予測例がある⁴⁾。大型軽水炉以外の革新炉導入は、天然ウランの消費速度を早め、高速炉導入時期に影響することに留意する必要がある。

増殖比が1を越える高速炉の資源利用率は、炉心部とブランケット部の平均燃焼度、再処理毎の回収ロス、そしてMAリサイクルの有無に依存し60%~99%となる。すなわち、ワンスルー大型軽水炉と閉サイクル

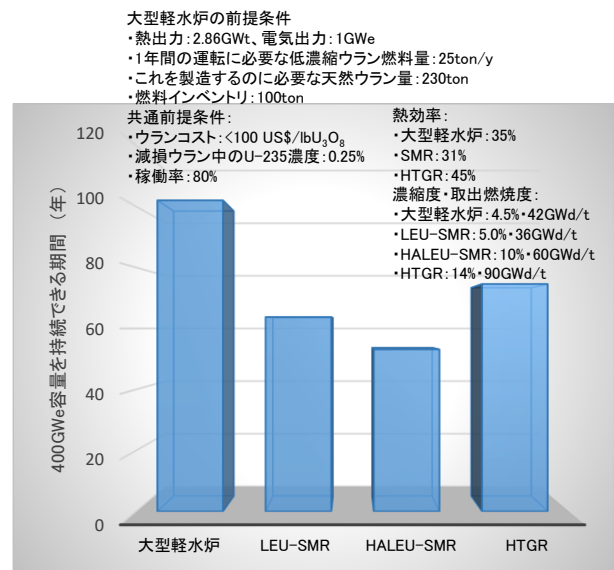


図2 既知ウラン量で400GWe分の発電設備容量を
持続できる年数比較

型高速増殖炉の資源利用率には 120～200 倍 (=60/0.5～99/0.5)の違いがあり、熱効率の違いも考慮するとその差はさらに大きくなる。

世界が目指す脱炭素に向かいつつ、天然ウラン累積消費を適量レベルで安定化させ、ウラン価格の高騰を回避するには、着実な高速炉サイクルへの移行が必要である。

4. 放射性廃棄物問題に貢献する新型炉

原子炉の運転に伴い発生する使用済み燃料は、再処理により U と Pu を回収した後、高レベル廃液をガラス固化して深地層処分することが我が国の基本方針だが、分離核変換技術の適用により、放射性廃棄物の有害度継続期間の短縮、発生するガラス固化体数の低減、処分場面積の削減等ができる可能性がある。この技術開発の歴史は長く、日本での研究開発計画としては、1987 年の原子力開発利用長期計画を受け翌 1988 年に開始された群分離・消滅処理技術研究開発長期計画（通称オメガ計画）がある。また日本原子力学会では 1991 年から消滅処理研究専門委員会が設置され、長らくバックエンド問題を緩和する技術やその在り方が研究されてきた。

放射性廃棄物の何をどうすることが最終処分の負担軽減になるか。これは単純な様で複雑な問題である。その考察には、放射能、放射性毒性、存続時間、発熱量、廃棄物体積、処分施設の安全性能等の技術的指標に加えて、放射能を有する廃棄物でありかつ超長期にわたる問題故の、社会的受容性や世代間倫理といった社会的視点も必要であり、現在でも核変換やバックエンドの専門家間で多様な考え方がある。例えば、① MA リサイクルにより放射性毒性がウランレベル以下となる期間を短縮しても、地層処分場の安全評価結果には何ら変わりがない、②MA の主成分である Np-237 の毒性はそもそも低く、さらなる低減は不要である、③Cs, Sr, Am 等の発熱性核種を回収しガラス固化体の発熱量を低減することで廃棄体の処分ピッチを短縮でき処分場面積を縮小できる、④ガラス固化体に封じ込む事が出来ずかつ岩盤へ吸着されず地中移行し易い長寿命核種 I-129、C-14、Cl36 等が重要な核変換対象核種である、④移行性の I-129 ですら、安全評価によるリスク（線量当量）は $10 \mu \text{ Sv/年}$ 以下であり、さらに低減しても処分安全の向上にはつながらない、⑤自然を相手とする超長期の問題故、予測シナリオや安全評価には限界があり、廃棄物のポテンシャルリスクの極力低減やその存続期間短縮の絶え無き追求は原子力業界の責務である、などが挙げられる。

いずれにせよ明確なのは、長寿命核種を核変換で短寿命化・安定化するには中性子を消費するため、臨界炉でこれを実施するには十分な中性子が必要なことである。図 4 にみる通り、Pu 燃料高速炉は核分裂あたりの発生中性子数が多いため、臨界維持に 1 個、消費された核分裂性核種を U-238 から補うために 1 個、その他漏れや構造材や冷却材への吸収を考慮してもなお余剰（0.2 個）の中性子が存在し、これを長寿命核種の核変換に利用できる。一方熱中性子炉では臨界維持と燃料の部分的維持しかできず、MA や LLFP を消滅するために十分な中性子をもたない。また重元素の内あらゆる親核種は、熱中性子に対する捕獲と核分裂の断面積比 σ_p/σ_f が大きいいため、熱炉では核分裂で消滅するより中性子を捕獲しより重い核種へと高次化する傾向が強い。もちろん、消費する燃料（核分裂性核種）量に制限が無いとすれば、熱炉でも MA や LLFP の核変換は可能だが、これは天然ウラン消費を早め、前章の資源論につながる事となる。

なお、将来の原子力が軽水炉やガス炉等の熱中性子炉と高速炉の複数炉型で構成されることを仮定すると、燃料や消滅対象廃棄物を相互にやり取りする協働系として、燃料維持と廃棄物燃焼を両立できる可能性がある。高速炉の持つ燃料増殖性能は、十分な発電設備容量に到達した時点でやがて不要となり、熱炉向けの燃料生産や、熱炉で発生した廃棄物の核変換に振り向けることができる。軽水炉、ガス炉、高速炉を資源や廃棄物の視点で相互に関連づけた導入シナリオの検討が必要である。

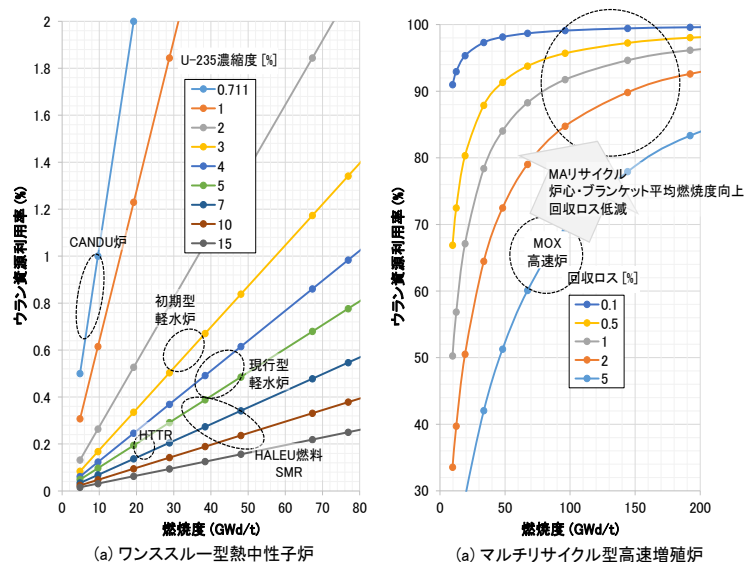


図3 熱中性子炉と高速増殖炉のウラン資源利用率の比

5. おわりに

我が国の炭酸ガス排出量を 2030 年に 46% 減、2050 年に正味ゼロとする政府目標の達成には、再エネの最大限の導入を図っても、原子力発電の活用は不可欠である。しかもそれには規模とスピードが必要なため、出力が小さく、開発途上にあり、許認可体制も整っていない革新炉の寄与は限定的とならざるを得ない。主役となる大型軽水炉には、既設炉の再稼働と寿命延長、そして革新軽水炉の導入が期待され、そのためには大きな初期投資に対する政府支援、建設期間短縮によるファイナンスリスクの回避、綻び始めているサプライチェーン維持強化のための迅速なプロジェクト開始が求められる。

資源消費型の熱中性子炉＋ワンススルー体系では、2050 年の炭酸ガス削減目標に必要な発電容量を維持することは、日本が確保・消費可能なウラン資源量制約の観点から、21 世紀中盤以降困難となる。長期的な低炭素社会の維持に核分裂炉の貢献が期待される限り、資源利用率を飛躍的に改善する高速炉＋リサイクル体系への移行（部分導入）が必須であり、特に、濃縮度の高い燃料を用いる SMR や高温ガス炉が一定のシェアを持つようになると、高速炉導入時期を早める必要すら生じる可能性がある。加えて、放射性廃棄物の有害度低減や毒性存続期間の短縮等、核変換の実施が必須の社会要請となった場合、それを実施するための中性子収支の観点から、さらに高速炉＋リサイクル体系の重要性は増してくると考えられる。

革新炉 WG では、安全性向上を前提としつつ付加する原子力の新たな価値として、変動性の再エネと共存するための「負荷追従性」、エネルギーの長期安定供給に寄与する「資源有効利用」、冷却材の高出口温度を活用した「水素製造」、放射性廃棄物の「減容・短寿命化」等について良く議論されたが、最後にもう一つの新たな価値について述べ本稿を閉じたい。それは原子炉による医用 RI の製造である。重粒子や BNCT によるがん治療は放射線を外部から照射するため、健全細胞への一定の放射線照射は不可避だが、近年発展しつつある標的 α 線療法では Ra-223 や Ac-225 等の短寿命 α 核種を注射で内用し、腫瘍内部からの照射となるため効果的である。原子炉や加速器設備に出向く必要もなく患者の負担は少ない。そもそも原子炉は、原理的にビーム束高、照射体積大、除熱能力大そしてエネルギー収支に優れる特徴があり、核分裂連鎖反応を司る中性子は、全てが有効活用されている訳ではなく、一定量は構造材への吸収や炉外への漏洩で消費されている。こうした中性子を有用な放射性同位体(RI)の生成に積極的に活用することを、これからの革新炉の設計段階から想定しておけば、発電の傍らで RI 製造を行うことは技術的に可能である。エネルギー分野に比べ医用 RI 分野の経済効果は日本では小さいものの、米国では 20 年以上も前から肩を並べる規模にある。IAEA は未だ核医学の恩恵に供せず癌により 1 千万人規模の犠牲を払う途上国へ核診断・治療を普及させるための”Rays of Hope”プロジェクトを 2022 年から開始している。供給が需要を生むはずだ。真の意味の「革新」を考えたい。

参考文献

1. 中島 学「ウクライナ情勢とエネルギー・トランジションについて」JOGMEC 石油・天然ガス資源情報 (2022 年 7 月)
2. 「今後の原子力政策について」第 24 回原子力小委員会資料 (2022 年 2 月)
3. 「IEA (国際エネルギー機関) による 2050 年ネットゼロに向けたロードマップの解説」公益財団法人地球環境戦略研究機関 (IGES) 気候変動ウェビナーシリーズ(2021 年 7 月)
4. 森 行秀、小野 清、大滝 明、高速炉戦略ロードマップ検討会報告 (2)長期的視点からの検討：高速炉開発の意義、2018 年日本原子力学会秋の大会新型炉部会セッション -2H_PL02-

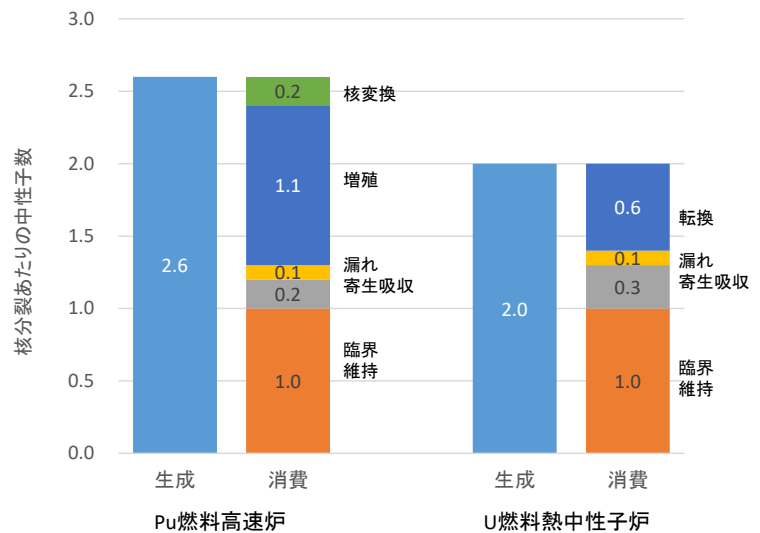


図4 高速炉と熱中性子炉における中性子の収支