

早期実用化を目指したMA-Zr水素化物を用いた核変換処理に関する研究開発

代表機関
東北大学
再委託機関
日本核燃料開発株式会社
大阪大学
三菱FBRシステムズ株式会社
ニュークリア・デベロップメント(株)

1

はじめに

エネルギーセキュリティのためには幾つかのエネルギー源のミックスが理想とされています。原子力は、CO₂を発生せず、備蓄が可能なエネルギーとして国内では、20%程度の電力を担うことが期待されています。

一方、原子力発電の問題点は、放射能を発生することです。特に寿命の長い放射性核種は、廃棄することが難しく長期にわたって人類を悩ませることになります。

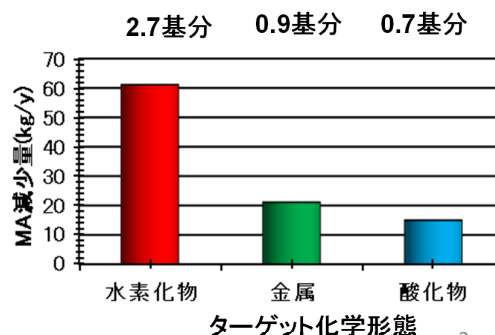
この研究の目的は、放射性核種を核変換炉という新しい原子炉で、中性子との反応により短寿命核種または安定核種に変換して廃棄し易くすることです。

原子炉で核変換するというアイデアは、1960年代から考えられ、いろんな方式が研究されてきました。しかし、なかなか実現しなかったのは、**核変換できる量を多くすることが難しい**ためです。原子炉の運転中には中性子が多く作られるが、それらの多くは、原子炉の運転維持に使われ、核変換処理には数が限られた中性子しか使用することが出来ません。

この提案では、この**限られた中性子を効率良く使う**ために、原子炉の材料としては、これまで使われた経験の少ない**水素化物を利用**します。

どれぐらい効率が良くなるか、本格的な研究に入る前に試算してみました。小型高速炉の周方向ブランケット位置にMA(マイナーアクチノイド)を置いて中性子を吸収させます。

その際にMAを水素化物、金属、酸化物と変えてみますと、水素化物にした場合は、金属や酸化物の場合の**3倍以上のMAの減少**が期待出来ます。



2

最適化炉心(MFBR)

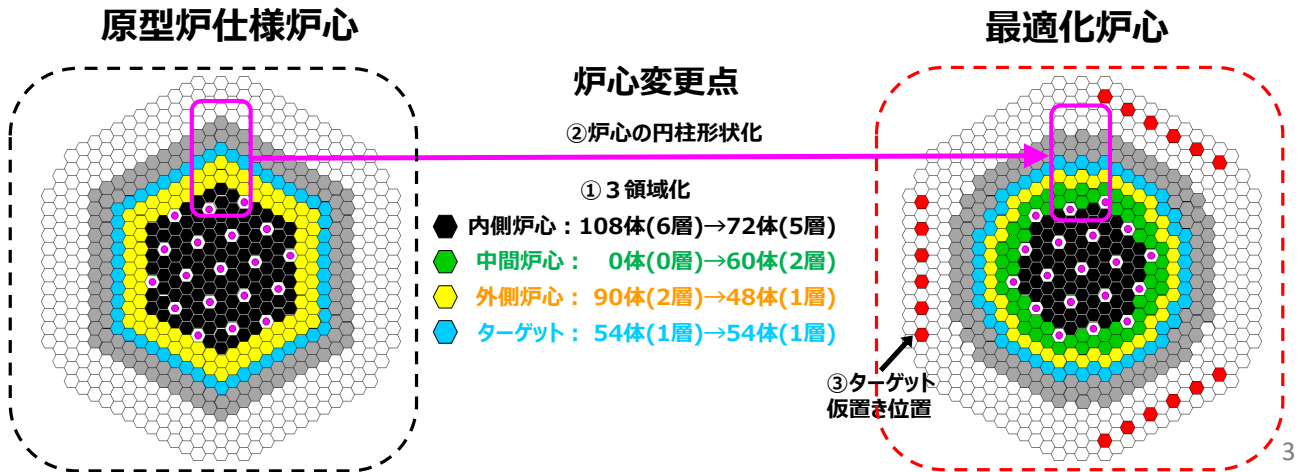
MAの中で地層処分の負担低減効果が最も大きいAmを対象とした。

✓核変換の効率化(全中性子束の向上策) (←特許申請)

- ① 3領域炉心：設計上限値となるPu富化度を有する外側炉心燃料(1層)
最大線出力上限値を達成するPu富化度を有する中間炉心燃料(2層)
運転中の臨界を維持できるPu富化度を有する内側炉心燃料(5層)
- ② 円柱形状炉心：中性子束が低い炉心コーナー部のターゲット(各3体)を炉中心側に移動

✓照射済みターゲットの崩壊熱対策(←特許申請)

- ③ 照射済みターゲットを、中性子遮蔽体領域に照射後1サイクルの間仮置きする運用の採用
着眼点：ターゲットは、中性子照射量が少なく、ほとんど照射変形しないため、再装荷可能
主熱源であるCm-242の崩壊熱は約163日で半減



核変換特性及び炉心安全特性

制約条件は全て満足し、炉心安全特性は原型炉の許容範囲内であることを確認

項目	単位	原型炉仕様炉心 (2領域均質炉心)	最適化炉心(3領域均質炉心)	
			高核変換割合型	高核変換量型
Pu装荷量	t/炉心	1.71	1.84	1.91
Am/(Zr+Am)比	-	0.08(上限値)	0.10	0.25(0.35まで可)
最大線出力(注1)	W/cm	374/-/320/243	288/374/285/280	275/375/305/358
Naボイド反応度(注1)	\$	2.9/-/-1.2/-0.5 (炉心合計：1.7)	2.7/0.2/-1.5/-0.6 (炉心合計：1.4)	2.7/0.2/-1.7/-0.6 (炉心合計：1.2)
Am核変換割合(注2)	-	0.18(0.23)	0.19(0.23)	0.10(0.12)
Am年間核変換量(注2)	kg/EFPY	54(70)	86(102)	114(131)
Am受入れ可能量(注3)	GWe-LWR	4.5基分	7.2基分	9.5基分

結果

- ✓ 30基の軽水炉が稼働している状況を考えれば、高核変換割合型では4基程度、高核変換量型では、3基程度導入すれば、発生量と核変換量がバランスする(Am蓄積量は増加しない)
- ✓ 特に、Naボイド反応度は1.5\$より小で、Np未分離のPuを炉心燃料に使用しても原型炉より小

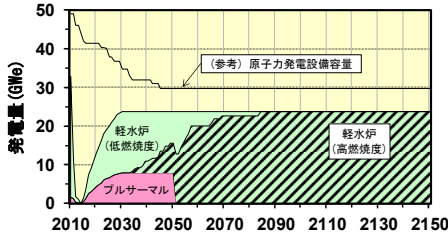
(注1) 原型炉では、内側炉心3.03、外側炉心-0.26(炉心合計2.77)

(注2) カッコなしは全炉心(炉心燃料、ブランケット燃料、ターゲット)の評価値、カッコ内はターゲットのみの評価値

(注3) 1GWeのLWR(燃焼度45GWd/t)の年間Am発生量を12kgとして計算

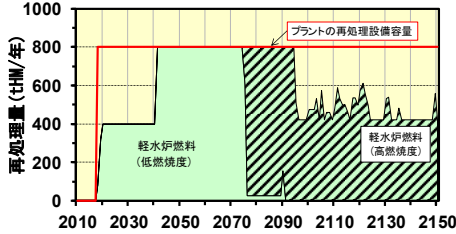
国内での導入シナリオ (NDC)

軽水炉発電計画



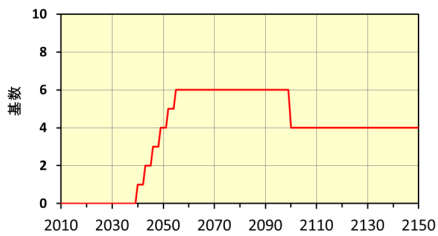
- ・国の基本計画に基づき、軽水炉を順次再稼働し、2030年に発電容量約30GWe(原子力発電比率20%)に到達する(設備稼働率80%)。
- ・発電容量の1/3をプルサーマル運転とするが、小型高速炉導入後に必要なPu-fを確保するため、2050年でプルサーマル運転を軽水炉運転に切り替え。

再処理計画



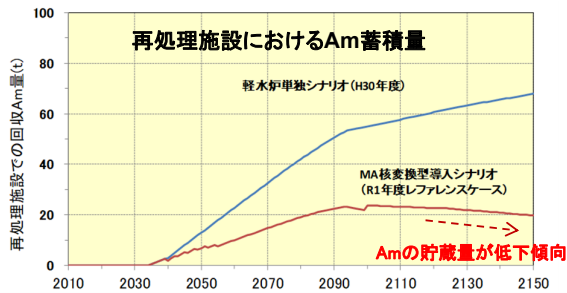
- ・Pu貯蔵量を抑制するため、再処理量は、小型高速炉を導入する時期(2040年)までは、400tHM/年(稼働率50%)とし、2041年以降は、800tHM/年とする。
- ・小型高速炉用MAターゲット作製のために、2035年からAmを回収。

核変換用小型高速炉導入計画

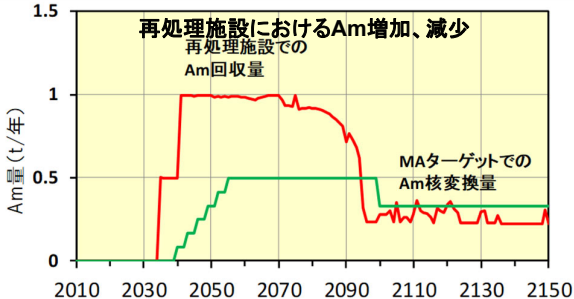


- ・核変換用小型高速炉として、ターゲット領域でのAm年間転換量が多い、高核変換量型炉心をレファレンス炉心として選定。
- ・可能な限り、速やかにAm貯蔵量を減らすために、2040年から3年毎に増設し、合計で最大6基を導入。
- ・小型高速炉に供給するPu量を確保するために、2040年、2043年に導入した小型高速炉は、2100年に廃止し、新設は行わない(廃止後は4基で運転継続)。

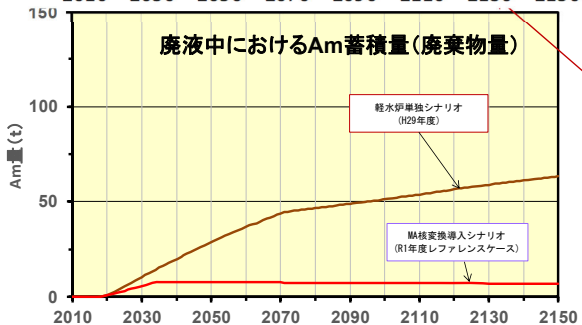
核変換炉導入の効果 (NDC)



2040年から小型高速炉を導入することで、2150年時点において再処理施設で回収したAmの貯蔵量が約70tonから約20ton*まで低減し、低下傾向を示す。
 *: 再処理施設で回収されないで廃液中に移行するAmは約7ton(回収率99.85%を想定)



既存の使用済み燃料の再処理が終了した後(2095年以降)は、核変換用小型高速炉を4基導入することで、MAターゲットでの核変換量(約0.3ton/年)がAm回収量(約0.2ton/年)を上回るため、再処理施設でのAmの貯蔵量が低下。



軽水炉リブレースに伴い、一時的にAm回収量が増加

- ・軽水炉運転と再処理により、2150年時点で約70tonのAmが廃液中に貯まり、処分対象となる。
- ・小型高速炉を導入することで、2150年時点のAm量は約7tonとなり処分場への負荷が大幅に低減する。

1. MA-Zr水素化物の作製(東北大、NFD、阪大)

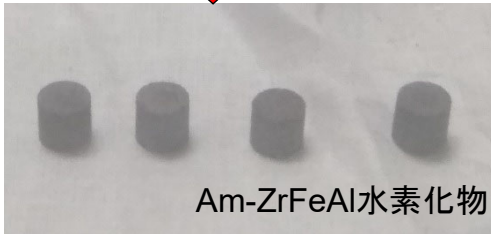
ロシア原子炉科学研究所 (RIAR) において Am-Zr 水素化物を初めて作製した。



金属Am(約4g)



Am-ZrFeAl合金



Am-ZrFeAl水素化物



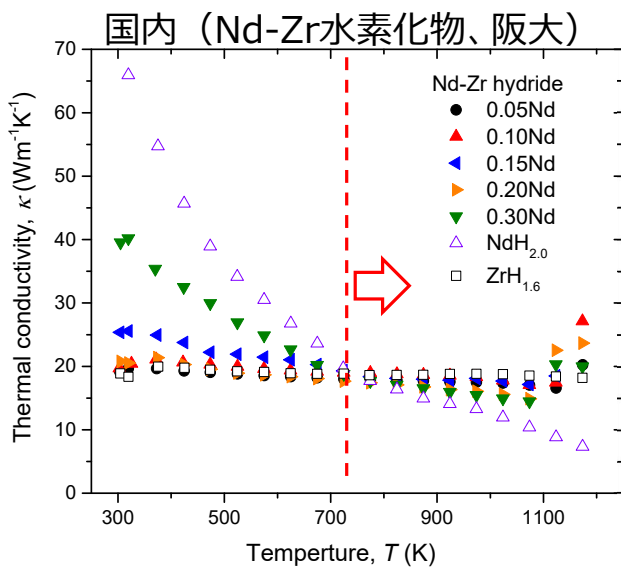
ロシア原子炉科学研究所 (RIAR) で実施

Am酸化物還元用グローブボックス



合金作製、水素化物作成用グローブボックス

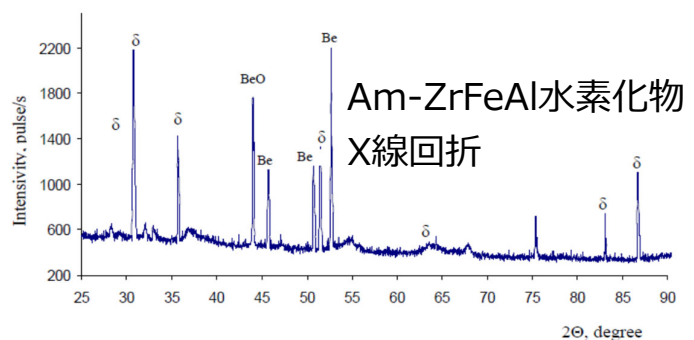
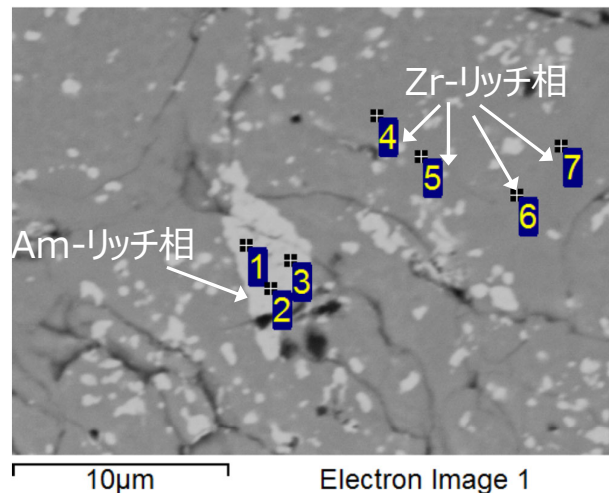
物性測定(阪大、東北大)



Nd-Zr水素化物の熱伝導率温度依存性

- ・1%酸素フロー中による測定によって、800℃付近までの高温データ取得に初めて成功した
- ・Zr水素化物の母相の中に微細なAm水素化物相が均一に分散している

ロシア (Am-ZrFeAl水素化物)

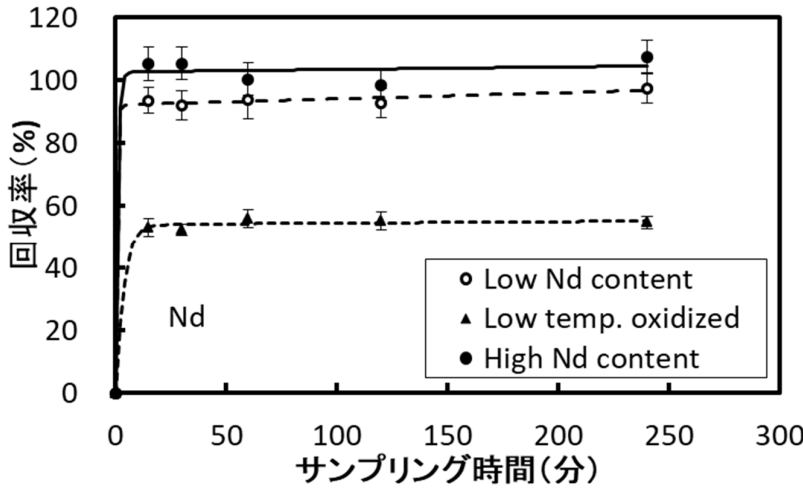


MA-Zr水素化物作製 リサイクル前処理技術開発(NFD、東北大)

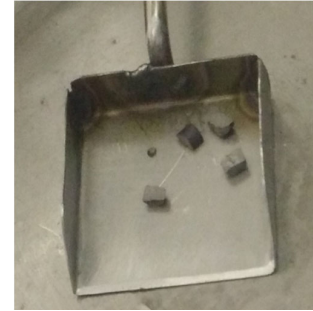
国内試験でZr-Nd合金に高温酸化処理を実施した場合、Nd含有率に関わらず、ほぼ全てのNdが硝酸に溶解することを確認した。

ロシアにおいてAm-ZrFeAl水素化物ペレットをLiCl-KCl溶融塩に溶かして回収したところ90%以上が回収出来る。

硝酸溶解とLiCl-KCl溶融塩溶解を組み合わせることで99.5%以上のAmを回収出来る。



国内試験結果(NFD)



Am-ZrFeAl水素化物ペレット



LiCl-KCl溶融塩
ロシア試験結果

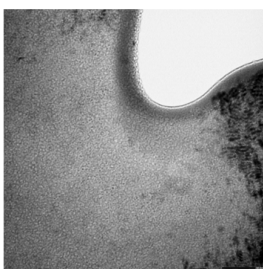
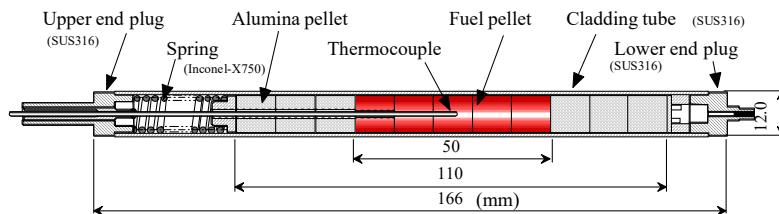
照射挙動評価-ペレットスエリング-(NFD)

ペレットスエリングとしては、(1)ポイドスエリング、(2)FPガススエリング、(3)固体FPスエリングが考えられる。(2)および(3)は核分裂割合が低いために影響は小さいと推定される。(1)については、1970年代のSNAP燃料(U-ZrH_{1.6}、785°C)の研究によってウラン相の近くのZrH_{1.6}相に直径10-120nmのポイドが発生するとの報告が有る。

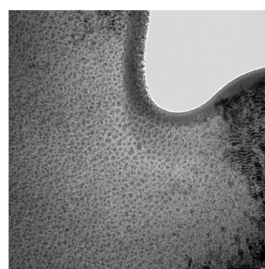
この現象についてJMTRでの照射済み模擬水素化物ペレット(U,Th,Zr)H_x (中央部530°C)のTEM観察を実施した。その結果、大きなキャビティは見られなかった。

今後より高温の照射試験が必要である。またHeガススエリングの検討も必要である。

JMTR照射済み模擬水素化物ペレット(U,Th,Zr)H_xの照射後試験結果(1.1%FIMA 180W/cm)

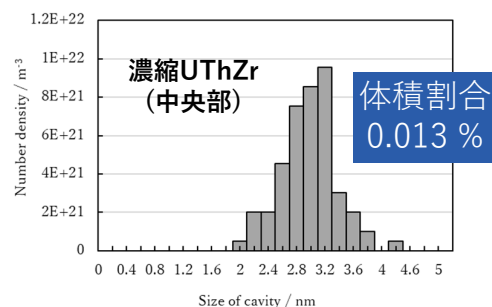


オーバーフォーカス 50 nm



アンダーフォーカス 50 nm

濃縮UThZr(中央部)TEM観察



キャビティサイズと数密度の関係

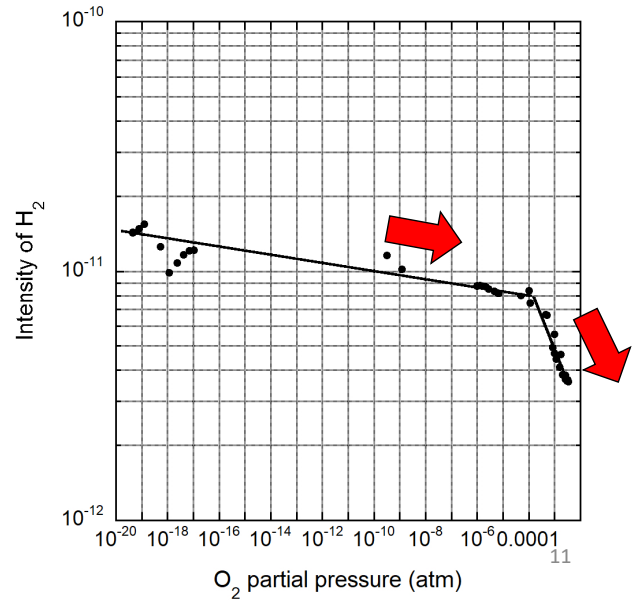
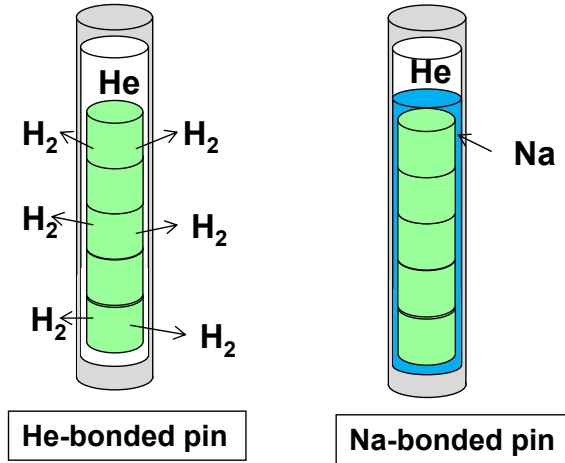
安全性技術開発（水素放出の抑制）

定常運転時

- Naボンドピンを用いることにより700°Cまで水素放出が抑制された。

事故時

- Naが無くなった状態（800°C）でも環境の酸素分圧が $PO_2=1 \times 10^{-4} \text{atm}$ より大きければ水素放出が抑制される。



まとめ

- 現在の技術の延長線上で可能な方法として、Na冷却酸化物高速炉の径方向ブランケット領域にAm-Zr水素化物を配置した核変換炉を考案した。
- 国内に軽水炉（1GWe）が30基稼働しているとして、高核変換割合炉（280MWe）を4基、または高核変換量型炉（280MWe）を3基稼働させれば、Am蓄積を極力抑えた核燃料サイクルが確立出来る。
- Am-Zr水素化物の作製に成功した。
- 下図のロードマップの通り、現在の技術で早期に実現できる見通しを得た。

- MA-Zr水素化物 I
（要素技術開発）
- MA-Zr水素化物 II
（ピン照射試験）
- MA-水素化物 III
（集合体照射試験）

