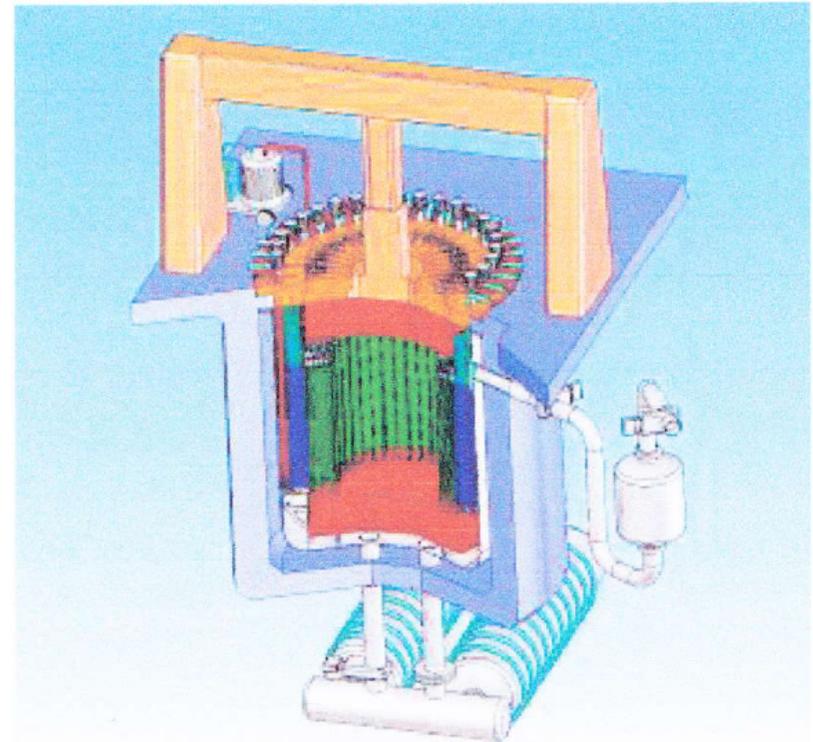
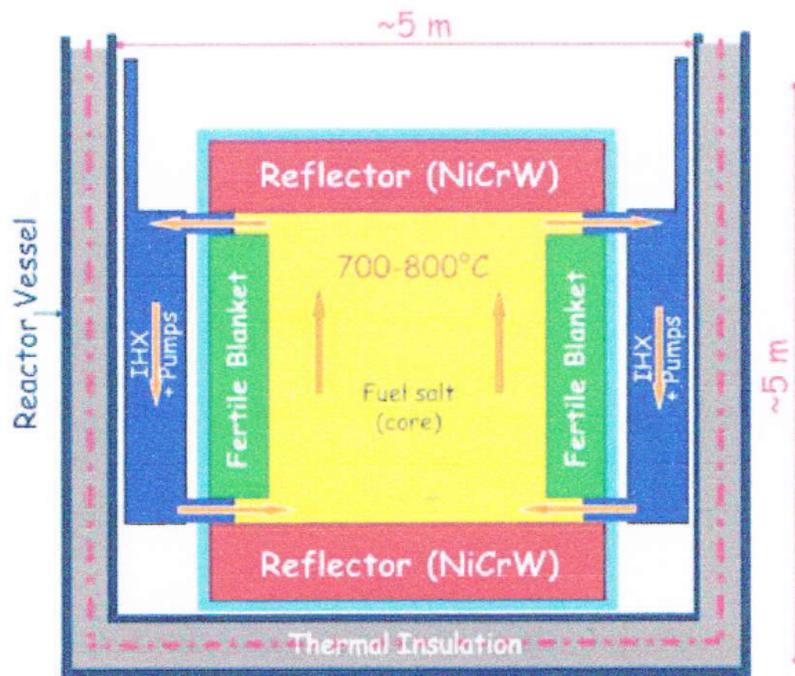


液体燃料原子力の技術的可能性 — 溶融塩炉 —

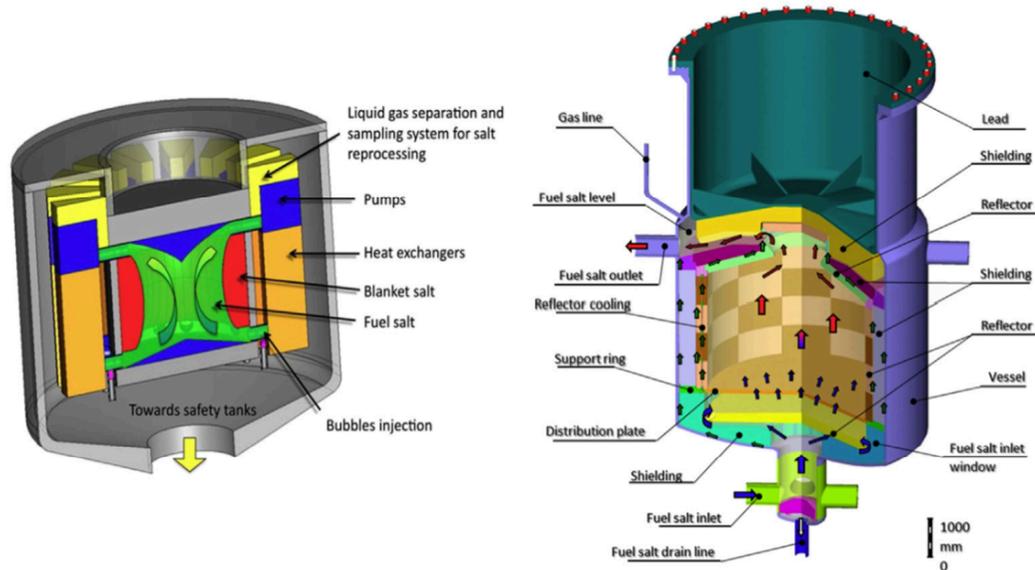


第四世代原子炉 (G-IV, OECD/NEA) 会議で検討中の
溶融塩炉がもつ技術的可能性を紹介する

木下幹康 (東京大学 RACE)

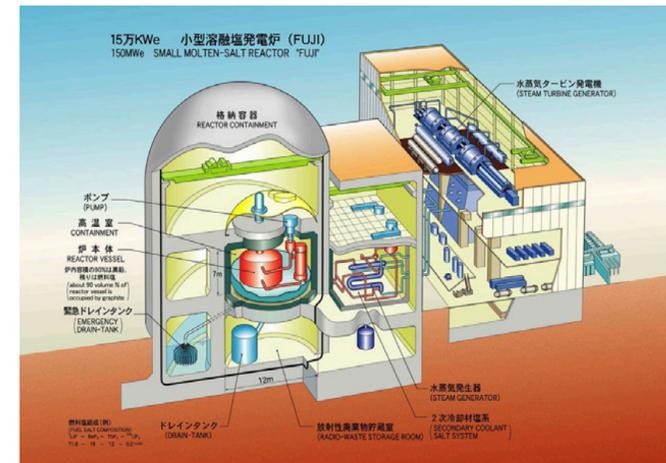
本資料の内容は全て個人による
検討結果であり東京大学としての
見解ではありません

熔融塩炉の概念設計例



フランス
FMSR

ロシア
MOSART



日本
FUJI

大きな分類は
 一流体式、二流体式(ブランケット付)
 減速炉(亜高速/熱中性子炉)、無減速炉(高速中性子炉)

熔融塩液体燃料炉の各種設計

技術方式		設計者		EVOL (仏)	MOL- TEX 塩素系 (英国)	廣瀬 & 三田地 FMSR 2014	福井大 山脇 有田	MSBR (ORNL) LF-1 (SINAP)	古川 吉岡 三田地 FUJI U3	F3R TTSinc	Le Blanc 又は 亀井 UNOMI	備考
除熱方式	燃料塩ループ流動型	●		●				●	●			①
	燃料塩静置・筐体内流動型		● ^C			● ^A				● ^B	●	②
再処理	オンライン 即時再処理型	●						●				③
	再処理 独立分離型											
	バッチ処理型		●	● ^B	●			●	●	●	●	④
	ワンス・スルー型			● ^A								④
	燃料オンライン投入／浄化	●		● ^B	●	●	●	●	● ^A		●	⑤
炉形式	熱中性子炉心							●	●	●	●	
	高速中性子炉心	●	●	●	●	●	●					
燃料の種類	トリウムサイクル型	●					●	●	●	● ^{v3}	●	
	ウラン・プルトニウム型		●	● ^{v2}	●	●	●			● ^{v1}	●	
	超ウラン元素専焼型	●	●	● ^{v1}	●	●	●			● ^{v2}		
備考		⑥	⑦	⑧	⑨					⑩		

熔融塩液体燃料炉の各種設計

技術方式		高速炉設計者								備考
		EVOL (仏)	MOL-TEX 塩素系 (英国)	廣瀬 & 三田地 FMSR 2014	福井大山脇 有田	MSBR (ORNL) LF-1 (SINAP)	古川 吉岡 三田地 FUJI U3	F3R TTSinc	Le Blanc 又は 亀井 UNOMI	
除熱方式	燃料塩ループ流動型	●		●		●	●			①
	燃料塩静置・筐体内流動型		● ^C		● ^A			● ^B	●	②
再処理	オンライン 即時再処理型	●				●				③
	再処理 独立分離型	バッチ処理型		●	● ^B	●		●	●	④
					● ^A					④
			ワンス・スルー型							
	燃料オンライン投入／浄化	●		● ^B	●	●	● ^A		●	⑤
炉形式	熱中性子炉心					●	●	●	●	
	高速中性子炉心	●	●	●	●					
燃料の種類	トリウムサイクル型	●			●	●	●	● ^{v3}	●	
	ウラン・プルトニウム型		●	● ^{v2}	●			● ^{v1}	●	
	超ウラン元素専焼型	●	●	● ^{v1}	●			● ^{v2}		
備考		⑥	⑦	⑧	⑨			⑩		

熔融塩液体燃料炉の各種設計

亜高速／熱炉

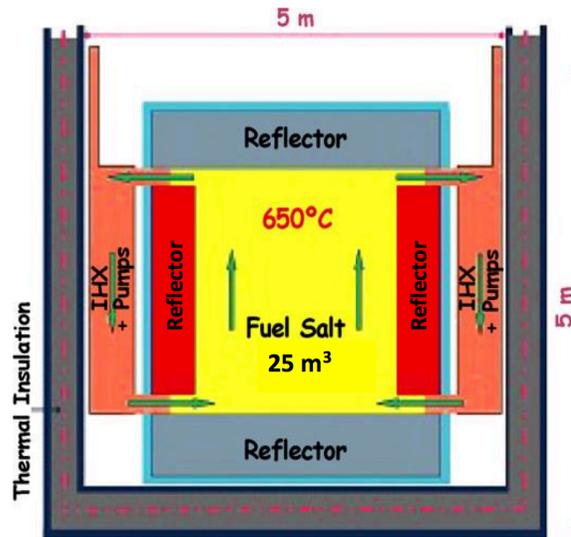
技術方式		設計者		EVOL (仏)	MOL- TEX 塩素系 (英国)	廣瀬 & 三田地 FMSR 2014	福井大 山脇 有田	MSBR (ORNL) LF-1 (SINAP)	古川 吉岡 三田地 FUJI U3	F3R TTSinc	Le Blanc 又は 亀井 UNOMI	備考
除熱方式	燃料塩ループ流動型	●		●				●	●			①
	燃料塩静置・筐体内流動型		● ^C			● ^A				● ^B	●	②
再処理	オンライン 即時再処理型	●						●				③
	再処理 独立分離型	バッチ処理型		●	● ^B	●			●	●	●	④
					● ^A							④
			ワンス・スルー型									
	燃料オンライン投入／浄化	●		● ^B	●	●	●	●	● ^A		●	⑤
炉形式	熱中性子炉心							●	●	●	●	
	高速中性子炉心	●	●	●	●	●	●					
燃料の種類	トリウムサイクル型	●					●	●	●	● ^{v3}	●	
	ウラン・プルトニウム型		●	● ^{v2}	●	●				● ^{v1}	●	
	超ウラン元素専焼型	●	●	● ^{v1}	●	●				● ^{v2}		
備考		⑥	⑦	⑧	⑨					⑩		

- ① 液体燃料を冷却材としても用い、燃料塩のポンプで熱交換器 (HEX) を通し除熱する設計。1960年代にORNLでMSRE (実験炉) として稼働実績、資料多数。
- ② [A]は燃料塩タンク型、[B]は円筒カプセル封入型 (カプセル単位で燃料交換)、[C]は棒状液体燃料棒型。BとCはFPガスのベント配管は無く完全密閉型。
- ③ 炉心の核分裂生成物をオンラインで除去し、炉内fissileを最小化し事故時の安全性が高い。反面、配管からのPa取り出し等で核不拡散抵抗性が低下する可能性もあるとされ、セーフガード設計の課題がある。
- ④ [A] Fuji ではオンライン投入と取り出しは行うが最小限量に止め本格的な塩の浄化は含まない。バッチ式で、定期的に本格的な再処理を行い、浄化した新燃料を投入する。
[B] 基本的にはワンスルーであっても、浄化工程は必要になると考えられる。
- ⑤ フランス、グルノーブルのチームによる高速中性子溶融塩。二流体式でブランケットを置く。トリウムを含む塩を用いてCm (キュリウム) の消滅を目指す。ロシアの設計案 MOSART と概念・設計とも共通性がある。
- ⑥ [V1] ロシアのPonomarevの基本設計 (一流体炉) に基づき化学工学プロセスフローを組み合わせた構想。2105ANS春の会議で論文発表予定。
[V2] フランスの高速中性子溶融塩炉 (EVOL) プラント設計に寸法は準じるがブランケットの代わりに反射体を置いた一流体炉。
- ⑦ 英国 Weinberg Foundationの活動から派生しBirminghamのIan Scottらが考案した塩化物熔融塩を用いる高速熔融塩炉。燃料は密閉燃料棒型、冷却はタンク型。低建設コストでエネルギー生産の代替、国内Puの有効利用を狙う。
- ⑧ 液体燃料・溶融塩炉の長所により適時燃料投入が可能。その結果、核分裂性物質のインベントリーを臨界量とおほ同量に保てる。事故時の炉心形状変化で反応度が下がり未臨界となる設計では核的安全性が高い。但し投入量と同量が、再処理工程にまわり、廃棄物が発生する。

[A] 廣瀬による。熔融塩燃料再処理の工程で、核分裂生成物 (FP) を除去する際に発生する廃棄物量を最小化するため、FPを可能な限り原子炉寿命の最後まで炉心内にとどめるオプション。
[B] 三田地による。Fuji設計のバッチ処理の考え方を引き継ぎ、定期的にバッチ式再処理を行うオプション。
- ⑨ ICONE23 (5月17-21日、千葉、幕張) で福井大・国際原子力工学研究所から発表予定。
- ⑩ 溶融塩燃料を充填した円筒を縦に並べ溶融塩で冷却する小型炉。(社)TTS (Thorium Tech Solution) の発案によりNAISによる炉物理設計がある。

超ウラン元素の処理 計算例

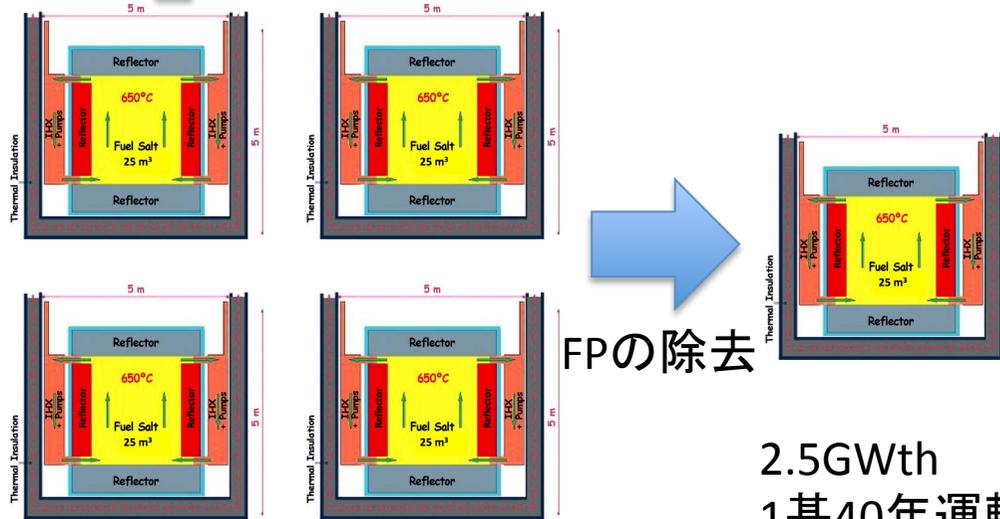
三田地、原子力学会2014年(京都)



炉心直径 2.8m、高さ 2.7m、燃料塩体積 25m³
 燃料塩: LiF=NaF-KF(FLiNaK) + MA
 一流体式(ブランケットなし、無減速・均質炉)
 燃料補給 25日ごと(稼働率 0.9)
 燃料塩の浄化再処理: 2年サイクル

FPの除去
 Flox 法(日立)
 0.1%のTRUテール

60GWd/t (PWR)
 の成分でTRU
 (Puなど188トン)
 を投入



TRU残留
 7.2トン

炉内
 残存TRU
 は0.103%

2.5GWth(1GWe) 4基
 40年間運転

2.5GWth
 1基40年運転

結語

[1] 溶融塩炉の開発の機運が盛り上がっている

1. OECD/NEAでの第四世代炉グループによる概念設計の進展(中国の野心的計画が刺激となった)
2. 民間ベンチャーによる簡易型炉の早期実現の試みが活発化している
3. 中国CASと米国との共研(CRADA)でDOE予算による米国大学-上海SINAPの共研が開始されている

[2] 液体燃料原子炉(溶融塩炉)の設計検討から、確保済みのウラン(33万トン)と超ウラン元素を用い以下の可能性が開ける。[廣瀬・三田地・島津らの提案]

1. 無減速(亜高速／高速中性子)溶融塩炉の導入によって群分離や加速器中性子の支援なしに、TRU量を低減し、エネルギーに転換できる。
2. エネルギー生産・転換処理システムで発生するPuとMAは廃棄物リサイクル処理で炉心内に保持し、一定値に保たれる。廃棄物からのTRU排出は0.1%以下。(ORIENTサイクルの溶融塩炉バージョン)

[3] 溶融塩炉すなわち液体燃料をもちいた均質炉によって開ける原子力エネルギー世界の可能性は大きい。概念設計ならびに実現に向けたR&Dタイムラインを検討をする価値がある。