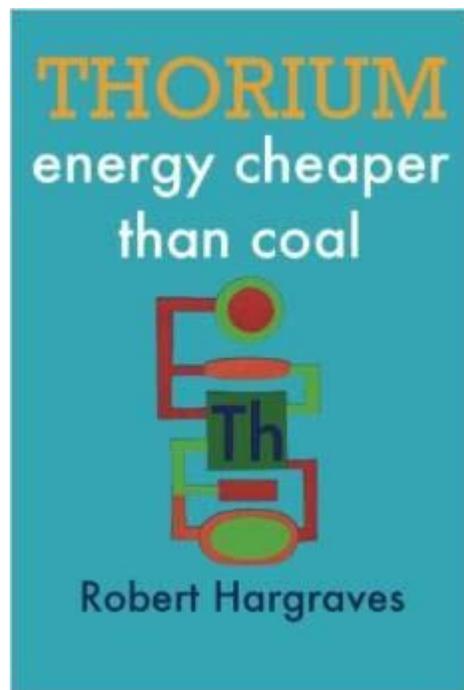


新型炉部会セッション
第4世代原子炉の国内外の開発動向

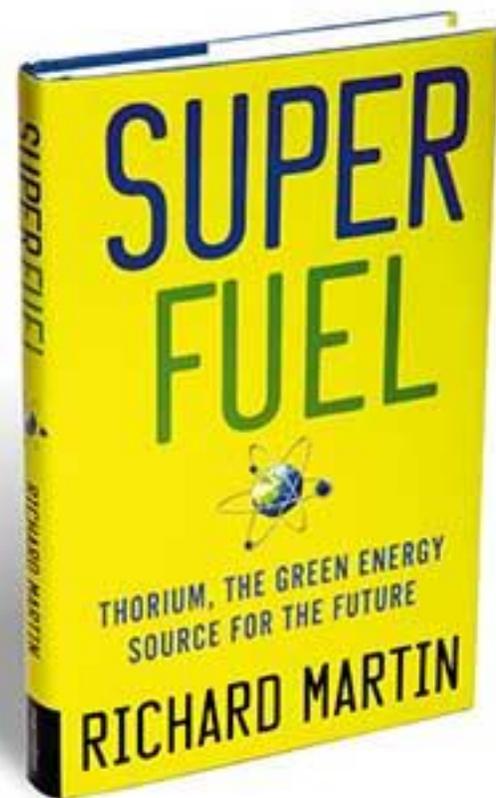
**(5) 熔融塩炉・トリウム炉の
開発状況と計画**

溶融塩炉・トリウム炉を取り巻く状況



安全
長寿命廃棄物なし
経済性に優れる
資源豊富
燃料増殖可能
核拡散の懸念小

・ ・ ・ ・





[原子力 eye \(アイ\) 2011年 04月号](#)

2011/3/10

(前略)

とはいえ、U サイクル体系がここまで整った現代において、敢えて Th に目を向け新たな開発を起こすほどの理由は容易に見出されるものではない。ところが「Th をなんとか活用する途はないか。核燃料として使えるのではないか」という声は、意外にも原子力界の外から聴かれるようになった。

(中略)

希土類鉱石には Th が含まれることが多く、放射性である Th の処理・処分がレアアース生産活動の足かせになっているのだ。厄介者扱いされている副産物 Th をエネルギー資源として活用し得るならば、レアアース資源とエネルギー資源が同時に確保できることとなり、技術立国日本の産業基盤を支える物質戦略とエネルギー戦略の両面に益をもたらす可能性がある。

本特集では、この様な意味で Th が注目されている現状を受け、核燃料としての Th 利用の展望について、資源、原子炉、核燃料そして再処理といった多様な分野の専門家から、最先端の知見を紹介いただくとともに、Th 利用に対する期待や課題を綴って頂いた。

(東海大学工学部原子力工学科 教授 高木直行)

トリウム関連会議



THORIUM ENERGY ALLIANCE

T.E.A. Portal | T.E.A. Objectives | Resources | MSRE & misc | Conference Proceedings | Join/Support/Shop | Contact Us

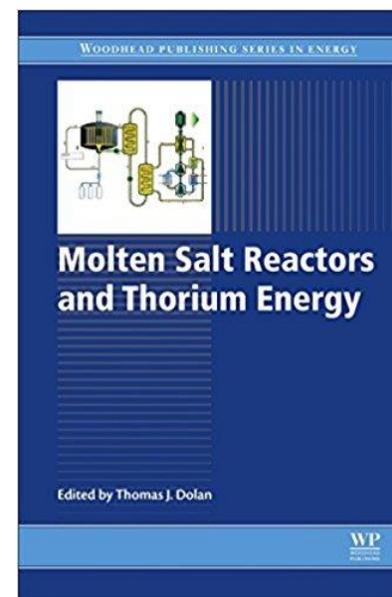
The 8th Annual T.E.A Conference proceedings can be found [HERE](#).

T.E.A. Conference 8
August 21 & 22, 2017

Thorium Energy Alliance
Suite 201
107 W Front St
Harvard, IL 60033
312-303-5019
thoriumenergyalliance@gmail.com

What's on your mind?
Join or start a discussion.

The following presentations are from the Eighth Thorium Energy Alliance Conference held in St. Louis, Missouri in August 2017.

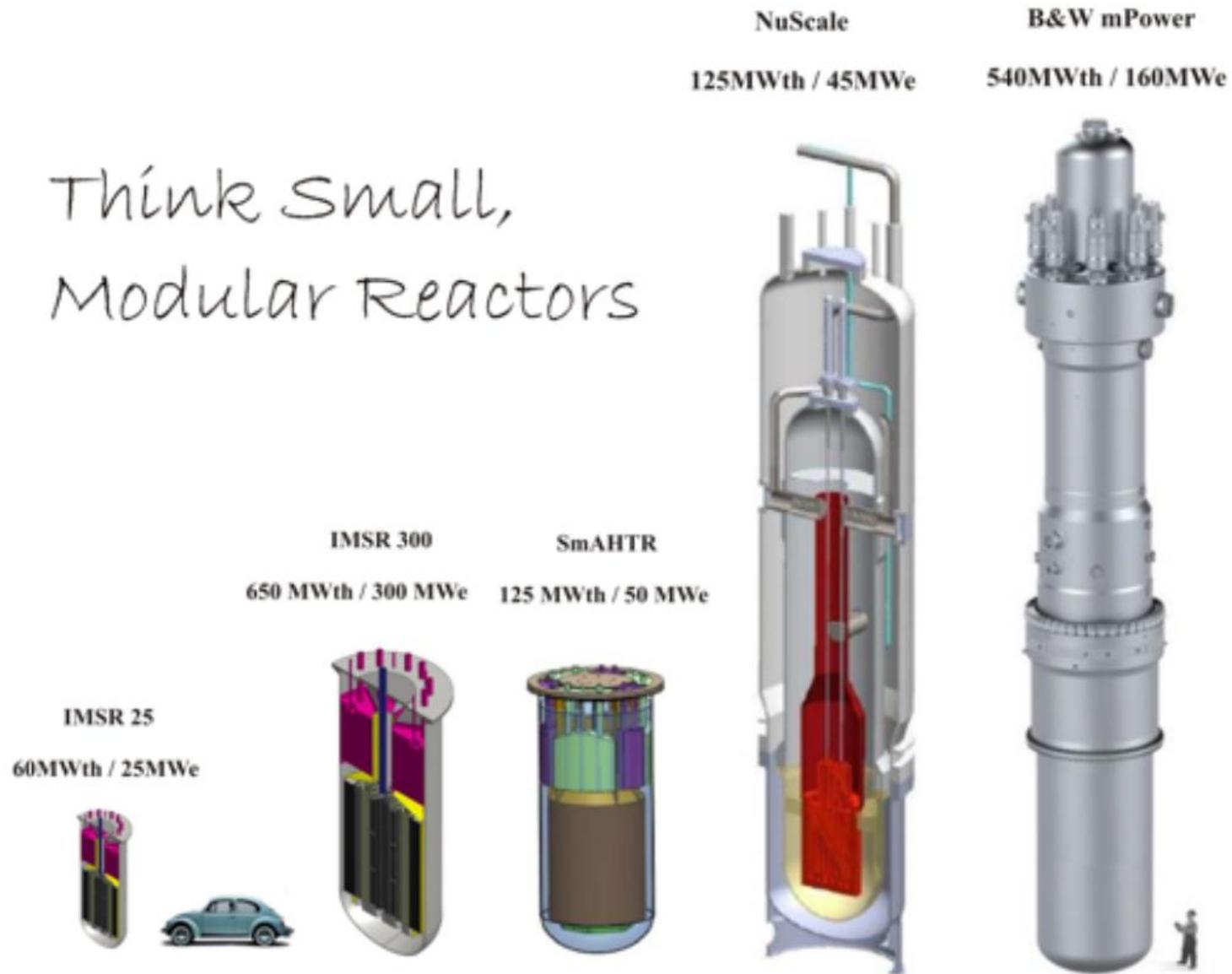


Molten Salt Reactors and Thorium Energy (Woodhead Publishing Series in Energy) 2017/7/8

溶融塩炉の特徴

1. そもそも溶融塩とはイオン結晶を主成分とした高温で溶融した塩であり、フッ化物と塩化物がある。
2. 原子炉の目的に応じて、ウラン、トリウムや超ウラン元素(TRU)が燃料としてこれらの塩に混合される。
3. 燃料が液体のため、燃料の成形加工が不要であり、再処理との適合性に優れ、沸点が高いため一次系を低圧にできる。
4. 固体燃料棒で生じる燃料ペレットの膨張や被覆管損傷課題といった課題が無い。
5. 原理的には、オンライン処理で燃料の連続供給や核分裂生成物(FP)の連続除去が可能であり、運転に伴い蓄積して中性子寄生吸収物質として働くFPの反応度影響を軽減できる。
6. トリウム燃料(Th-²³³U系燃料)を用いる場合には、熱中性子スペクトル下で燃料増殖が成立することが大きな特徴である。

Think Small,
Modular Reactors

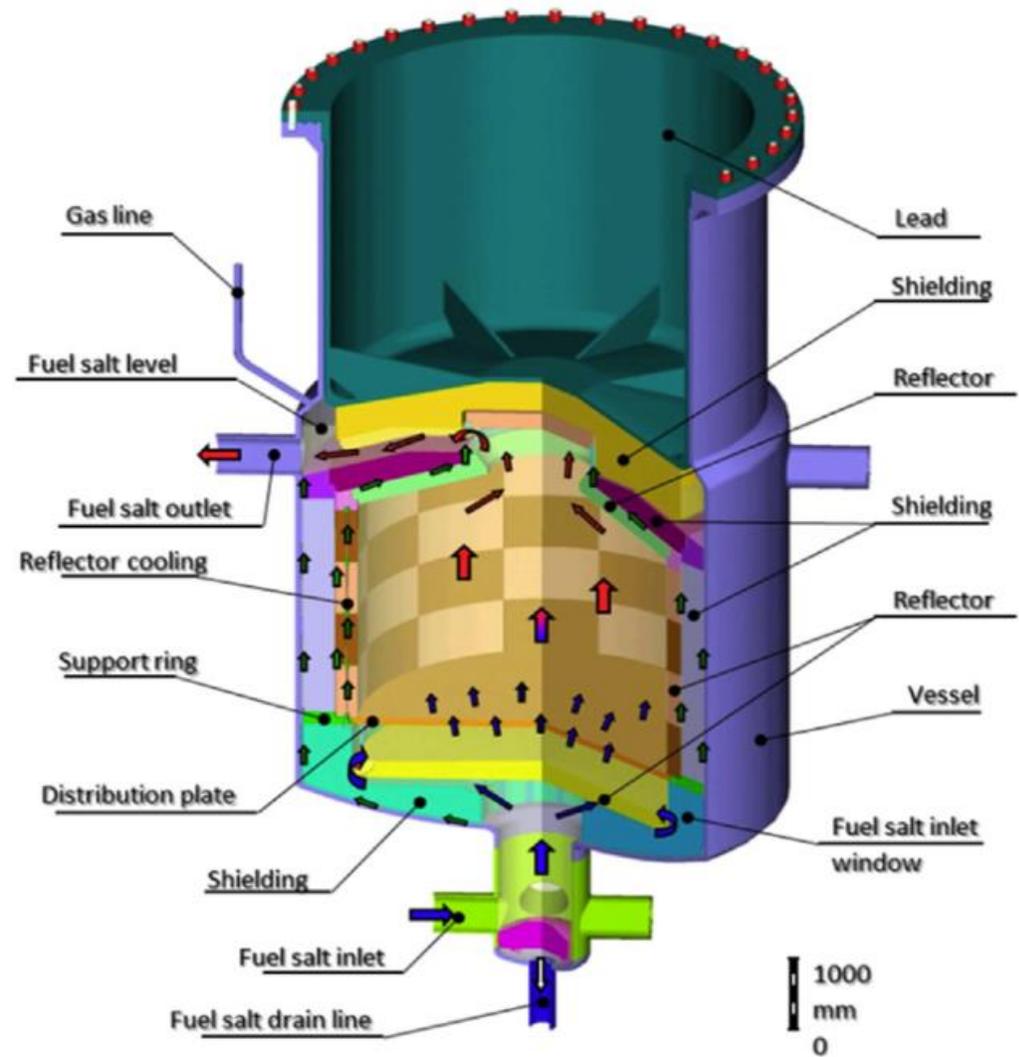
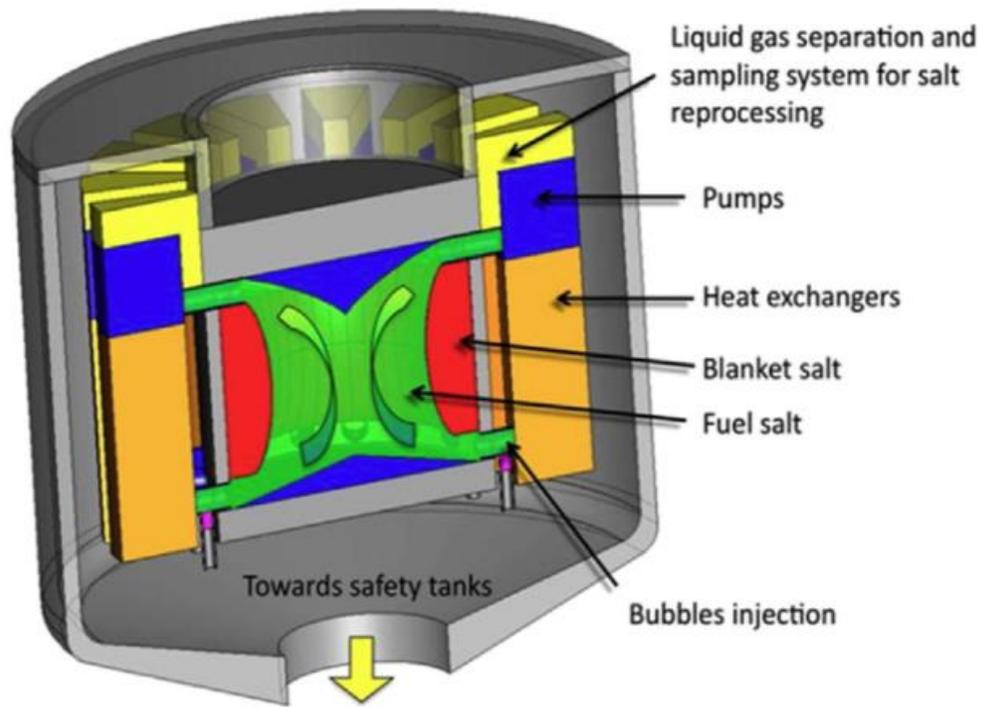


Gen-IV溶融塩炉の関係国

- OECD は、2001 年に米国がGen IVの国際共同開発を提唱して以来、第4世代原子炉国際フォーラム (Generation IV reactor International Forum: GIF) の事務局を務め、溶融塩炉委員会を主催している。
- このGIF溶融塩炉委員会で、研究に義務を負うMOU (Memorandum of Understanding) に署名している国 (連合) は署名順でユーラトム、フランス、ロシア、スイス、アメリカ、オーストラリアである。
- ロシアのクルチャトフ研究所では1976年からMSR研究計画を進めており、当初本委員会への正式参加を見送っていたが、自国概念とGen-IV概念の共通性を活かせるとの判断で2013年末MOUに署名。
- 中国は2012年に永年オブザーバーとして参加することを宣言した。
- 日本は公式には関与無し。

Gen-IVの主眼「熔融塩高速炉」

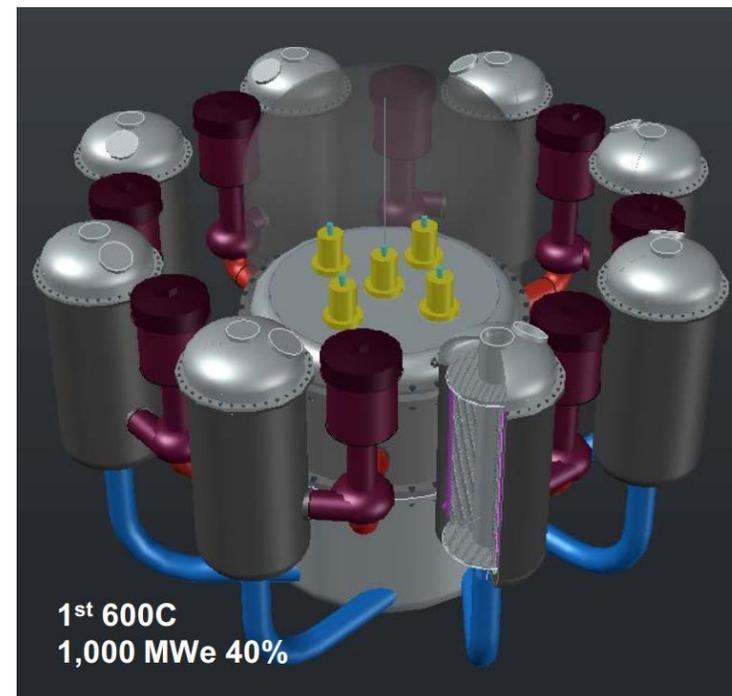
- 熔融塩炉の技術開発は、60年以上前、米国ORNLにてワインバーグ所長のもとで端緒が開かれた。
- 1954年に3MWt出力の航空機用原子炉(ARE)が、1965年には8MWtの実験炉(MSRE)が建設され、後者のMSREは1969年までに13,000時間の全出力運転実施。
- これらの実証実験は黒鉛減速熱中性子スペクトル炉を対象としたものであったが、Gen-IVでは、特に固体燃料高速炉の代替炉としてプルトニウムまたはU-233を増殖する、もしくは長寿命のTRU元素を燃焼する高速スペクトル型の熔融塩高速炉を主な対象に。
- 2016年時点では二つの炉概念が対象とされており、一つは仏CNRSで提案されたMSFR (Molten Salt Fast Reactor)、もう一つはロシアで開発中のMOSART(MOLten Salt Actinide Recycler and Transmuter)である。



溶融塩高速炉のMSFR（欧州）とMOSART（露）の炉心概念

熔融塩高速炉の特徴

1. 燃料サイクル上の自由度が大きく、増殖炉、転換炉、
燃焼炉のいずれとしても設計可能
2. 燃焼炉の場合、固体燃料では課題となる発熱や線量
の高いTRU含有燃料の成形加工が不要
3. 燃料/冷却塩のボイド反応度や温度反応度が負
4. 燃料/冷却塩は透明であり可視光での点検が可能
5. 炉心は減速材が不要であり除熱可能な臨界形状で
あれば良いため設計の自由度が高い



ELYSIUM INDUSTRIESが提案する
ループタイプの熔融塩高速炉

MOLTEN CHLORIDE SALT FAST REACTOR
(MCSFR)

熔融塩高速炉の中性子スペクトル

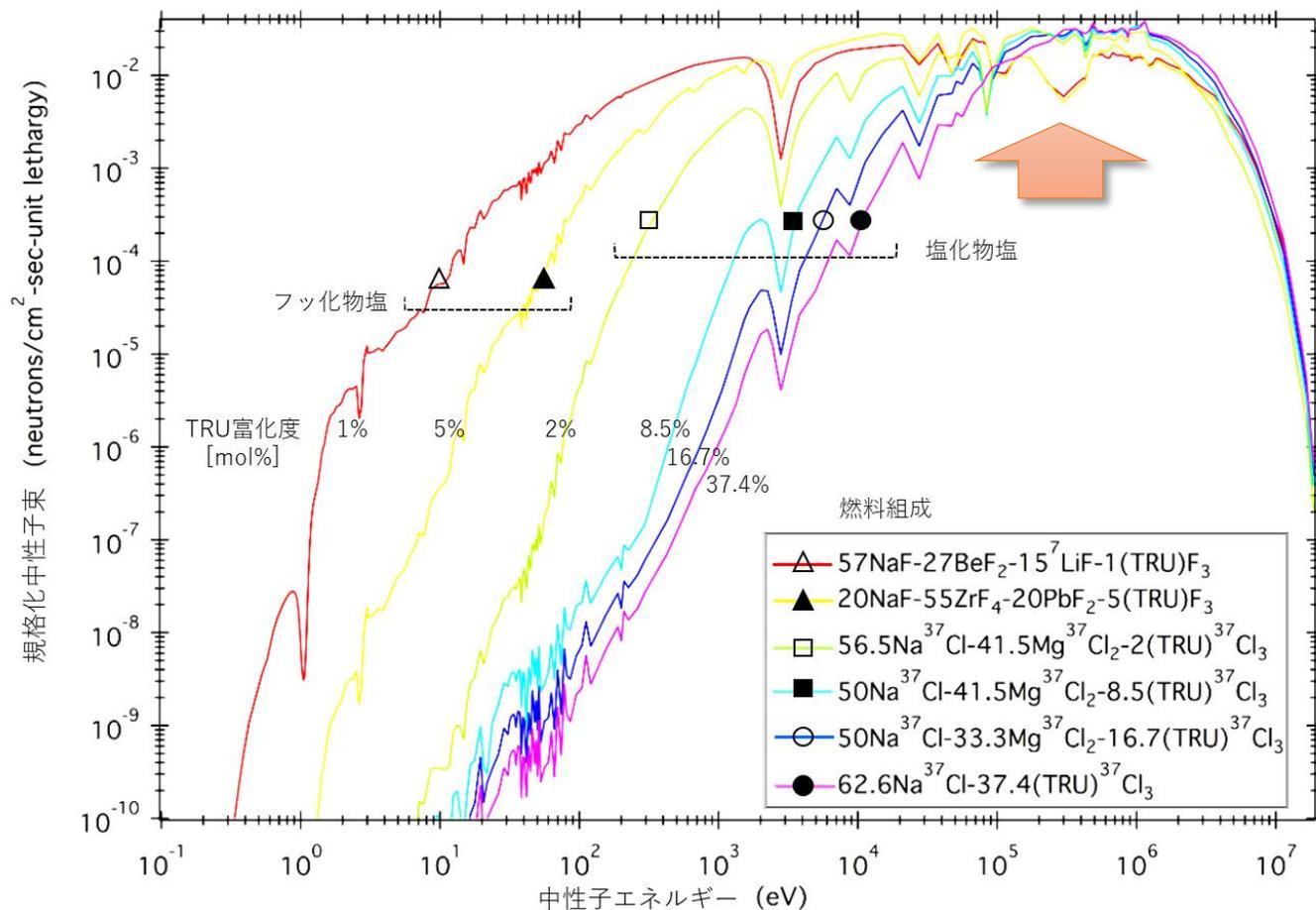


図1 燃料塩組成やTRU富化度をパラメータとした
熔融塩高速炉の中性子スペクトル

TRU含有率をパラメータとした無限体系解析

- フッ化物に比べて塩化物ではTRU富化度が同等でもスペクトルが硬い
- フッ化物では数百keVの領域で共鳴による中性子束の“くぼみ”
- F-19の散乱によるもので、転換性能への影響大
- 塩化物では、そうしたくぼみはなく、またTRU富化度が10%程度以上になるとNa冷却高速炉と同様なスペクトルとなる。
- 塩化物熔融塩炉では、半減期30万年のCl-36が大量に生成が課題

熔融塩高速炉の開発レベル

- 現時点の熔融塩高速炉は、数値解析で検討される概念レベルで技術成熟度は極めて低いもの。
- しかしながら、米でのMSREの経験や乾式再処理と金属燃料高速炉を統合したIFR(Integrated Fast Reactor)プロジェクトで蓄積した知見と経験を活用することが可能。
- また炉心は均質で構造が単純であり、炉心や1次系統は低圧システムであるため、熔融塩高速炉機器の製造に関わる技術の成熟度は低いとの見方もある。

GIFへは未参加ながら独自の熔融塩炉概念を追求しているベンチャー企業が多数存在
対象は**熱中性子熔融塩炉が中心**。

米:	Flibe Energy, Martingale Transatomic Power Thoreact
米/加:	Terrestrial Energy Elysium Industry
英:	Moltex Energy
デンマーク:	Seaborg Technologies Copenhagen Atomics

ベンチャーはノウハウが唯一の資産故、情報共有を目的とするGIF、IAEA活動には不参加。

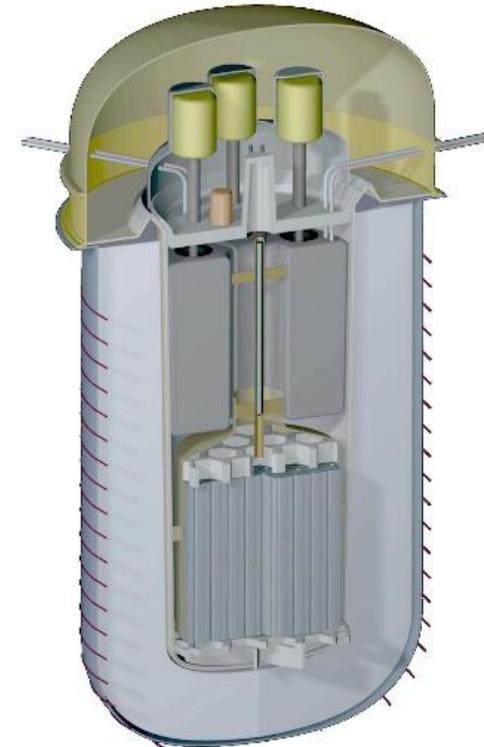
Gen-IVの枠組み以外で開発されている溶融塩炉の例

原子炉名称	国	設計者	熱出力 (MWt)	電気出力 (MWe)	ユニット数	中性子スペクトル	減速材構造物	燃料	冷却材	進捗段階
IMSR	カナダ	Terrestrial Energy	400	185-192	1	熱	黒鉛	フッ化物塩		概念設計
MSTW	デンマーク	Seaborg Technologies	270	100-115	1	熱/熱外	金属被覆黒鉛	フッ化物塩		概念設計
ThorCon	国際コンソーシアム	Martingale	557	250	4	熱	黒鉛	フッ化物塩		概念設計
TMSR-SF TMSR-LF	中国	上海応用物理研究所(SINAP)	395	168	1	熱	黒鉛	被覆粒子/ フッ化物塩	フッ化物塩	試験炉開発
FUJI 200	日本	トリウム溶融塩国際フォーラム(ITMSF)	450	200	1	熱	黒鉛	フッ化物塩		概念設計完了
Stable (Static) Salt Reactor	イギリス	Moltex Energy	94	37.5	8	高速	N/A	塩化物塩	フッ化物塩	概念設計
SmAHTR ¹⁾	アメリカ	ORNL	125	NA	1	熱	黒鉛	被覆粒子	フッ化物塩	予備的概念設計
LFTR ²⁾	アメリカ	Flibe Energy	600	250	1	熱	黒鉛	フッ化物塩		概念設計
Mk1 PB-FHR ³⁾	アメリカ	University of California, Berkeley	236	100	1	熱	黒鉛	被覆粒子	フッ化物塩	予備的概念設計

1)Small Modular Advanced High Temperature Reactor, 2)Liquid Fluoride Thorium Reactor, 3)Pebble-Bed Fluoride-salt-cooled, High-temperature Reactor

Terrestrial Energy

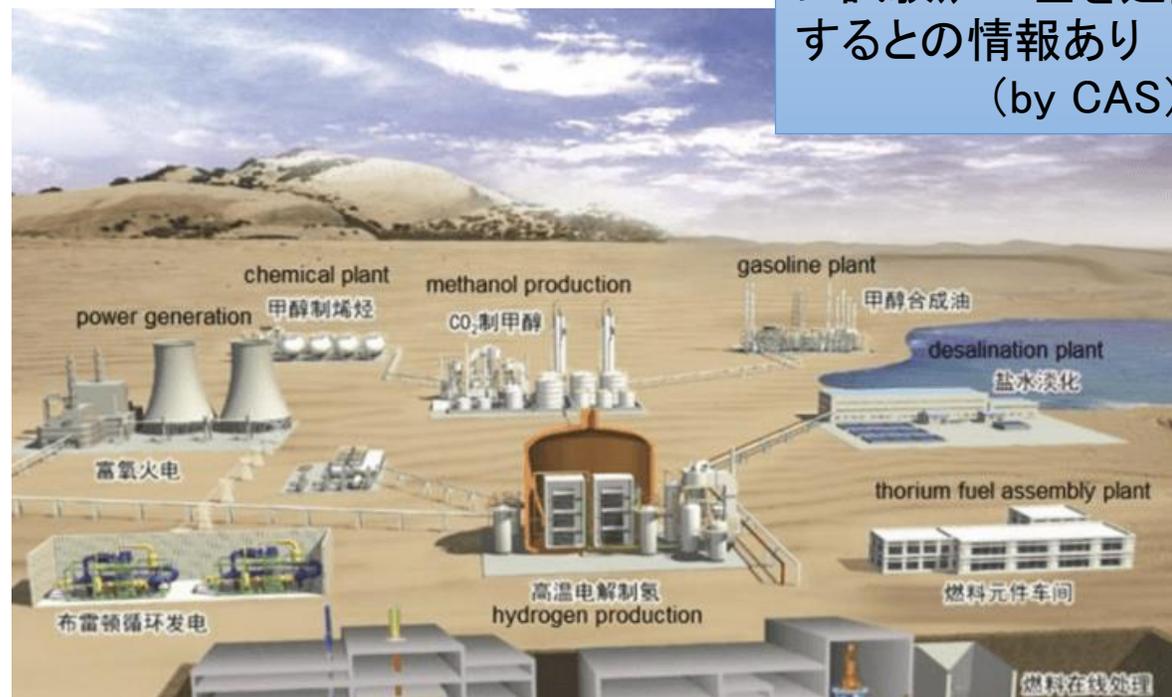
- 統合型溶融塩炉IMSR(Integral Molten Salt Reactor)
- 2019年後半にも設計認証(DC)審査をNRCに申請する計画
- 減速材に黒鉛、初段階の燃料に低濃縮ウランを含有したフッ化物塩を用い、熱交換器を炉容器内に配置した熱中性子溶融塩炉
- IMSR商業用初号機を2020年代に建設することを目標に、オンタリオ州にあるカナダ原子力研究所CNLのチョークリバー研究所所有のサイト内で建設に適した地点を特定するためのフェージビリティ・スタディ(FS)を2017年の夏に開始



中国上海応用物理研究所 (SINAP)

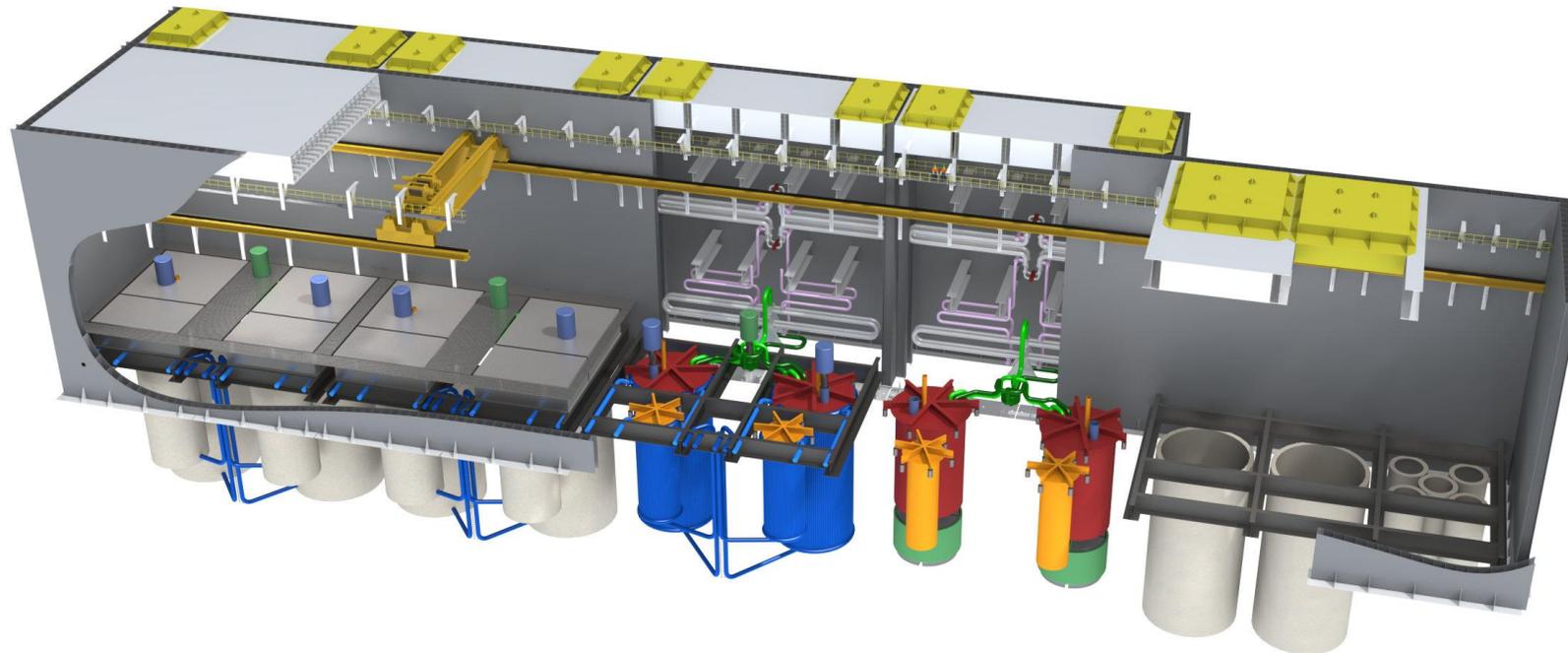
- 2011年に設置したTMSR 研究センターを中心としてTMSRプロジェクトを実施
- TMSRには、被覆粒子燃料を塩で冷却する固体燃料型のTMSR-SFと液体燃料のTMSR-LFの二種類がある
- 両炉型とも2MWthの試験炉、10MWthの実証炉を経て、複数ユニットで1GWeの商業炉へと発展させる計画
- オンライン再処理技術開発を伴うTMSR-LFはTMSR-SFより10年程度遅い展開
- 近年は実験データベースの充実を理由として計画全体がスローダウン
- 2015年時点で本計画に関与する人員は600名でその平均年齢は31歳と若い。本取り組みは中国全体の原子力人材の拡充にも寄与している。

予算約3000億円で
2020年までにゴビ砂漠
に試験炉二基を建設
するとの情報あり
(by CAS)



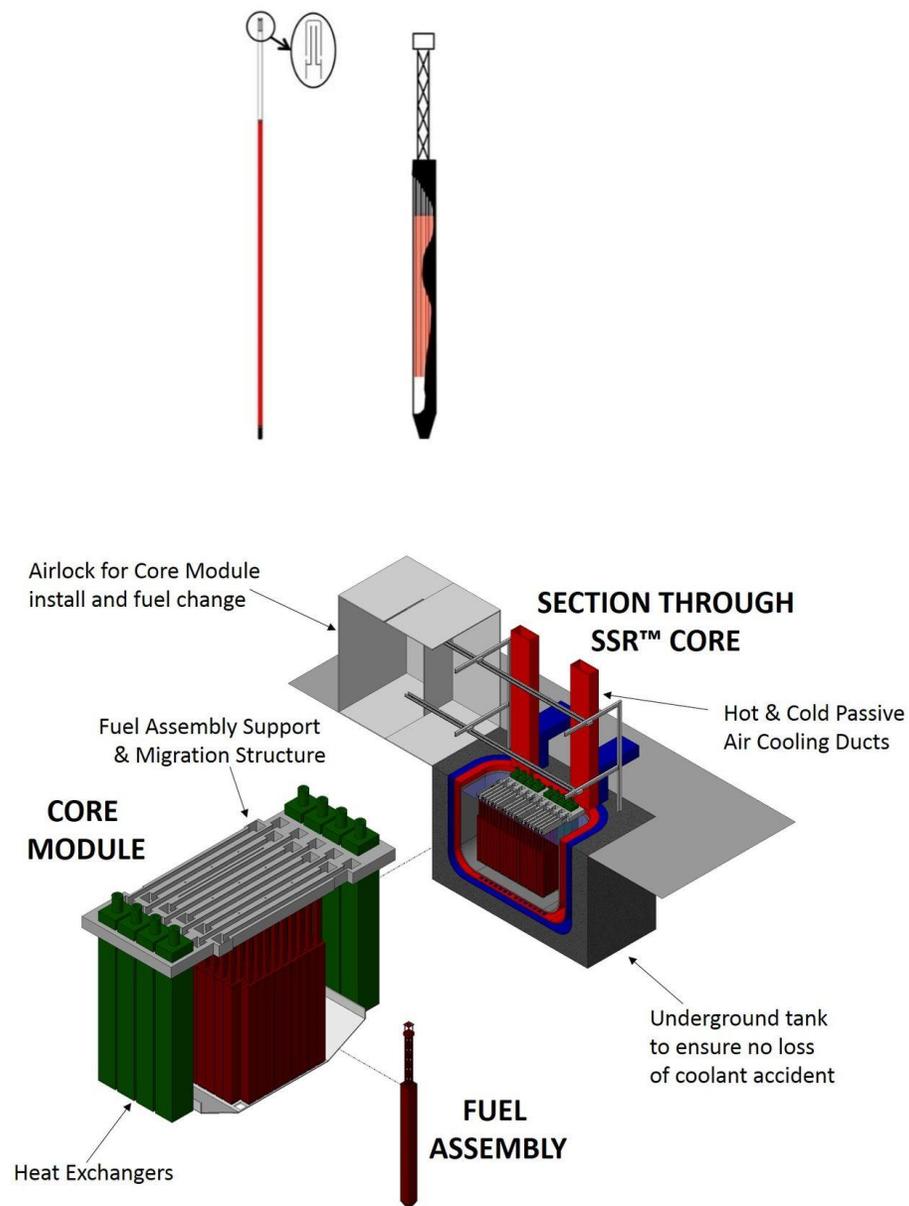
国際コンソーシアムMartingale

- 造船技術を活用したモジュール型の熱中性子溶融塩炉ThorCon
- 4年以内にもプロトタイプ炉の運転開始が可能な技術レベルで建設費は\$500/KWと
- 積極的なビジネス展開でインドネシアと開発に関するMOUを締結



Moltex

- 燃料ピン内に塩化物燃料塩を充填し、その表面を冷却材のフッ化物塩で除熱するStable Salt Reactorを提案
- 放射能の強い燃料物質やFPがプラントを循環せずピン内に留まっていることからStable- もしくはStatic-Salt Reactorと称される(いずれも略名称はSSR)
- 炉心には軽水炉の様に燃料ピンを束ねた集合体のみが配置され減速材構造物を持たない。このため塩組成やピンピッチなどの変更によって中性子スペクトルを熱、高速のいずれにも調整可能
- 燃焼/増殖の目的に応じた炉として設計できるとしているが、炉構成的に燃料塩体積比率が小さくウラン装荷量が少ないため、増殖炉とすることは容易でない

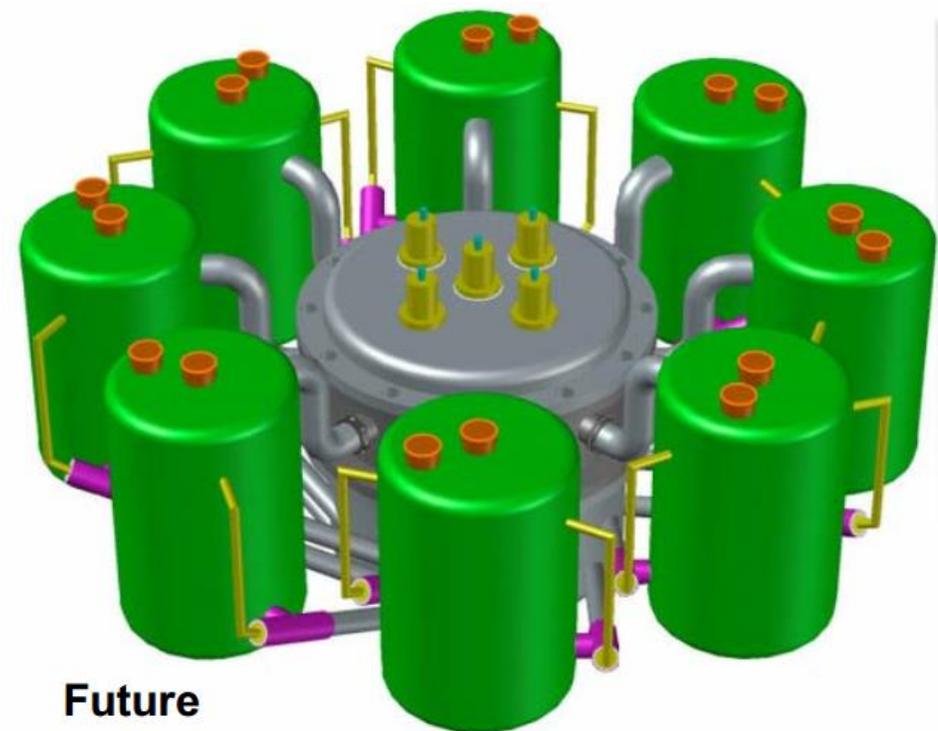


世界で溶融塩炉開発が活性化した背景

- 巨大津波が引き金とは言え、福島事故は、1) 従来の軽水炉の様に一次系が高圧、燃料ピン内側も高圧の炉は、2)電源喪失し除熱不足になると炉心が溶融し、3)水素ガスを発生させ爆発の恐れがあり、4)放射性物質を環境へ放散させる、5)事故後にも再臨界の可能性を持つ、との認識を世界に与えた。
- これに対し溶融塩炉は、1)低圧システムであり、2)燃料は元々溶融状態、3)水が無いので水素ガス発生無し、4)FP元素はある程度塩中にトラップされ放散を軽減、5)事故時には炉底部のドレインプラグで燃料塩を排出し未臨界達成、と定性的には上記の懸念に応える炉概念としてアピールされている。

まとめ

- 原子力に向けられる目は厳しさを増す一方、世界的には、エネルギー確保と環境保全を両立し得る原子力のポテンシャルを再認識する動きあり
- 一部では「固体燃料炉を知り尽くしたエキスパート」がそれを先導
- 原子力を”rebrand”したいとの思いが熔融塩炉開発を活性化させ、原子力界に新潮流を生み出している。進展を注視したい。



Future
1,500MWe 60%