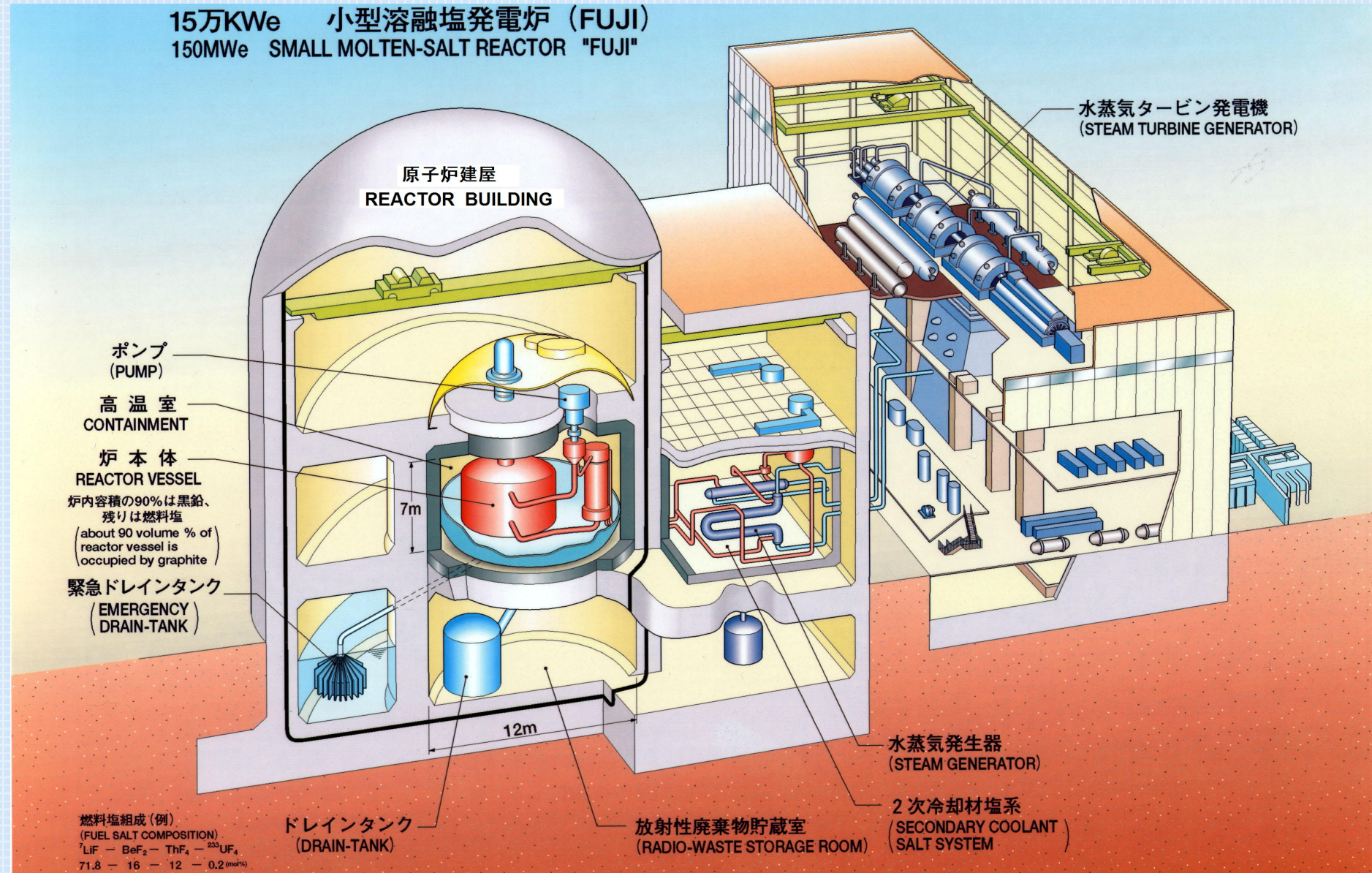


トリウム熔融塩炉とは、どんな原子炉か？

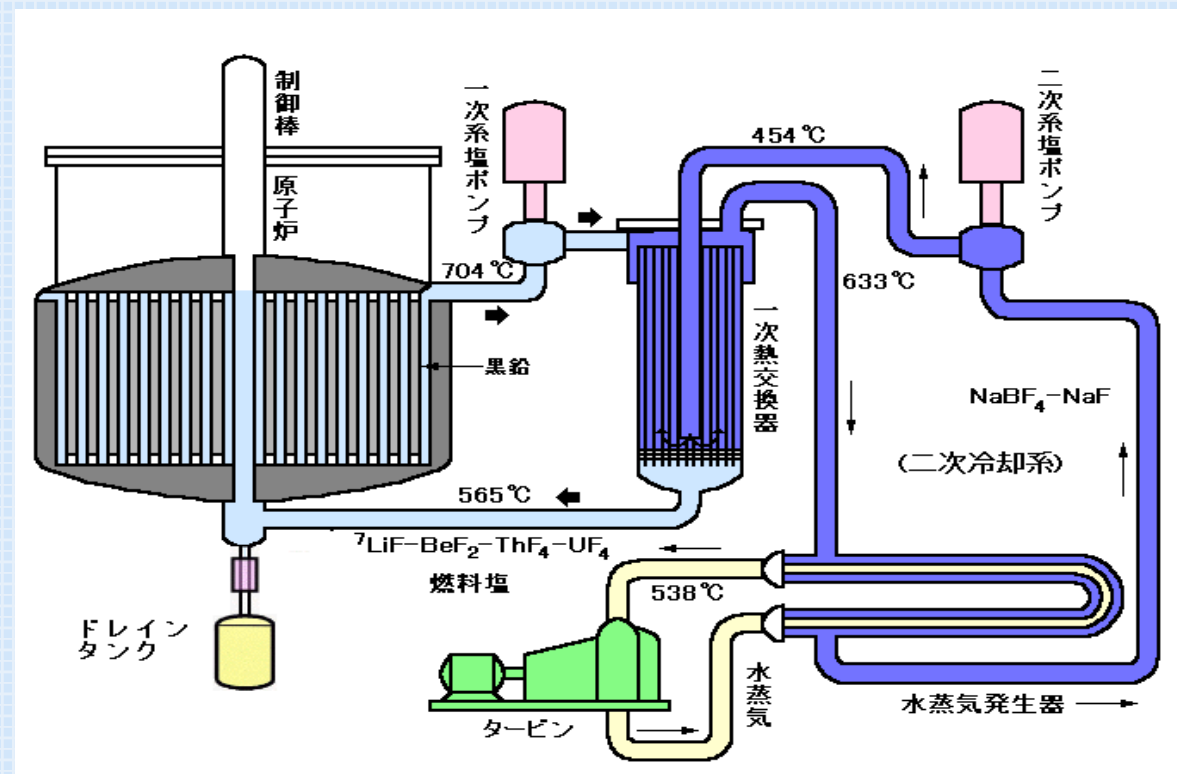
株式会社 トリウムテックソリューション (TTS)
取締役副社長 古川和朗

15万KWe 小型溶融塩発電炉 (FUJI)
150MWe SMALL MOLTEN-SALT REACTOR "FUJI"



トリウム熔融塩炉は「液体燃料炉」です 現在の主流原子炉である「軽水炉」は「固体燃料炉」です

トリウム熔融塩炉は、フリーベ($\text{LiF}-\text{BeF}_2$)と称するフッ化物熔融塩に、燃料親物質として**トリウム**を ThF_4 の形で 混入した混合熔融塩（約 500°C 以上で液体）に、核分裂性物質として少量の UF_4 または PuF_3 を混合したものを燃料とする液体燃料炉



脱炭素をどうやって実現？

- ◆ 脱炭素できなければ人類は生き残れないよね
- ◆ 少し遠い将来は太陽エネルギーでまかなえるかも
- ◆ 当面原子力かな、でもチェルノブイリや福島のリスクは
- ◆ そもそも発電所はプラント設備、液体や気体で作りたい
 - ❖ 軽水炉は固体燃料で運用している
- ◆ 軽水炉の原型は軍用潜水艦を浮上させずに運用するために発明された
 - ❖ 海軍にいたアルビン・ワインバーグによる
- ◆ しかし、アルビン・ワインバーグは民生用には別の形の原子炉が必要と主張
- ◆ じゃあ、どうする

ワインバーグの考えた民生用の原子炉

- ◆液体燃料で原子炉を運用するため、水溶液も含むさまざまな可能性を検討
- ◆もっとも "安定" なイオン結合物質を利用
- ◆原子炉は中性子経済学が重要
 - ❖中性子吸収の少ない物質を選択
- ◆ $\text{LiF} - \text{BeF}_2 - \text{ThF}_4$ (少量の UF_4 , PuF_4 を含めてもよい)
 - ❖融点 459°C 、沸点 1430°C 、約 700°C で安定な液体として利用
- ◆ $^{232}\text{Th} + n \rightarrow ^{233}\text{U}$ (核分裂性, 核燃料)
 - ・同時に ^{232}U ができて 2.6 MeV γ 線を発生、核拡散保安上有利
- ◆アルビン・ワインバーグはオークリッジ国立研究所でこのような熔融塩炉も発明、4 年間 (1965-1969) 実験炉 (MSRE) を無事故で運用
- ◆2011 年 1 月から江沢民の長男江綿恒の指示で上海 (と甘粛省) で再開発が始まった、その後米国でも数百億円規模の予算がスタートアップ向けに認められている

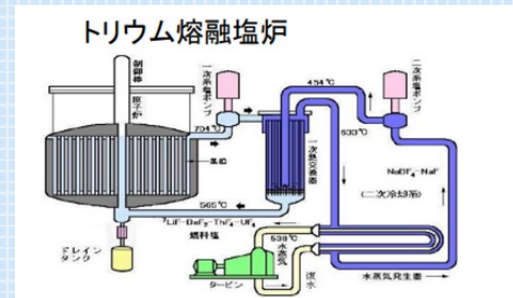
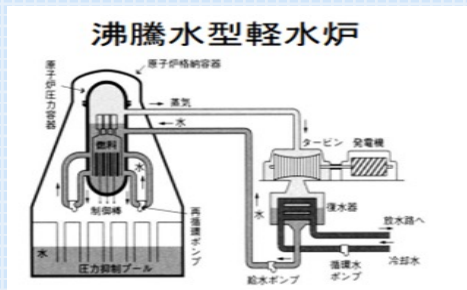
MSRE building in 2015



軽水炉との比較

「第一の核」の原子炉＝ウラン固体燃料

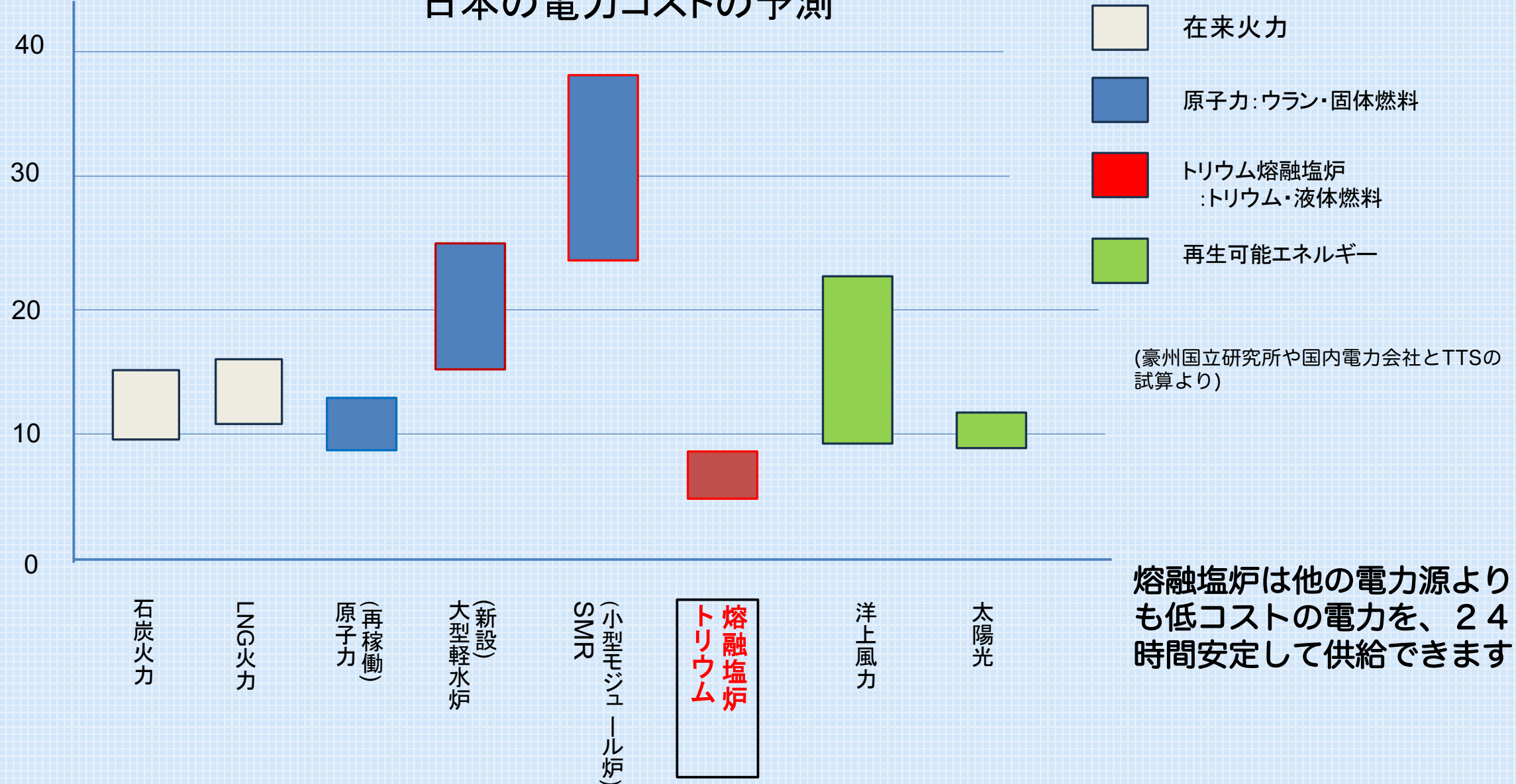
「第二の核」の原子炉＝トリウム液体燃料



	軽水炉	トリウム熔融塩炉
核燃料	ウラン 固体燃料・燃料棒あり(定期交換要)	トリウム 熔融塩液体燃料・燃料棒なし(交換不要)
冷却材	水 高圧(高圧容器要)	熔融塩液体燃料が冷却材を兼ねる 常圧の液体燃料が炉内を循環
出力	100万kWe以上(大型炉)	20万kWe程度(小型炉)が標準 100万kWeも可能
安定性	安全対策必要⇒構造複雑	原理的に安全⇒構造単純
発電コスト	>15円/kWh(新設の場合) >10円/kWh(再稼働)	6円/kWh以下

円/kWh

日本の電力コストの予測

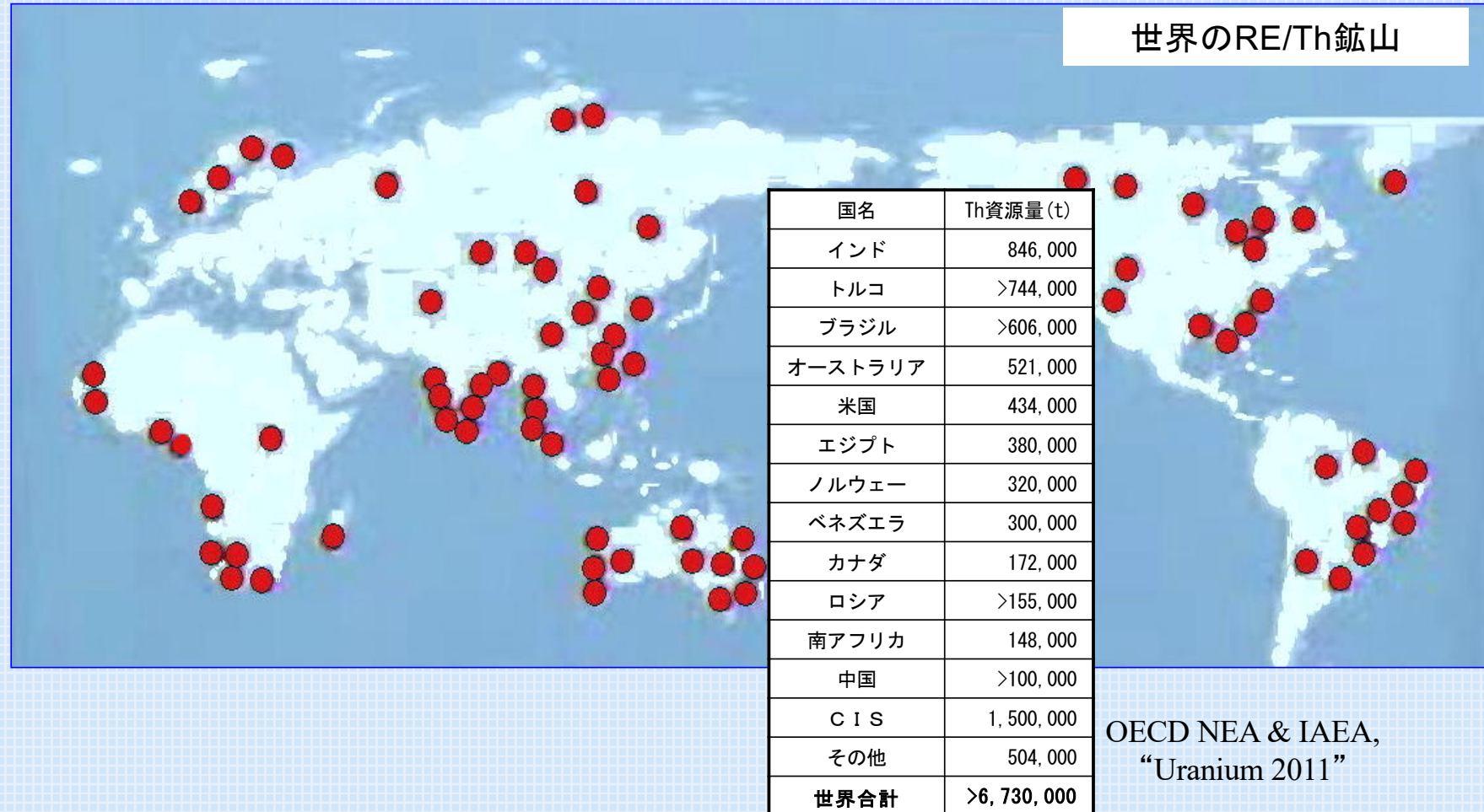


コストについて

- ◆ 熔融塩炉のコストについては、TTSにおいて炉心、格納容器、建屋設備、二次系、発電の総コストの積み上げ
 - ❖ 炉心は炉容器、燃料、黒鉛、ドレインタンクなどを含む
- ◆ 軽水炉のコストは豪州国立研究所の試算
- ◆ 他の電源は国内電力会社の試算

- ◆ 熔融塩炉が低コストになる理由は、安全設備の差異が大きい

世界のトリウム資源



レアアースの副産物(年間10万トンのREの約1割がTh)
1万トンのTh=100万KWeの原発1万基

熔融塩とは？

「熔融塩(Molten Salt)」とは一般に「塩が高温で熔融してできた液体」。

「塩」とは一般に酸とアルカリとが化学的に中和して生ずる化合物であり、最も身近な塩に食塩(NaCl)があり、食塩を高温で熔融させれば熔融塩の1種になる。

熔融塩は一般に透明で水のようなサラサラした液体であるが、非水溶液である。



熔融塩炉で用いられる熔融塩は、 $2\text{LiF}-\text{BeF}_2$ (通称フリーベ) という弗化物熔融塩であり、不活性で安定な化合物である。

フリーベ：融点 459°C 、沸点 1430°C



熔融塩炉MSR(Molten Salt Reactor)

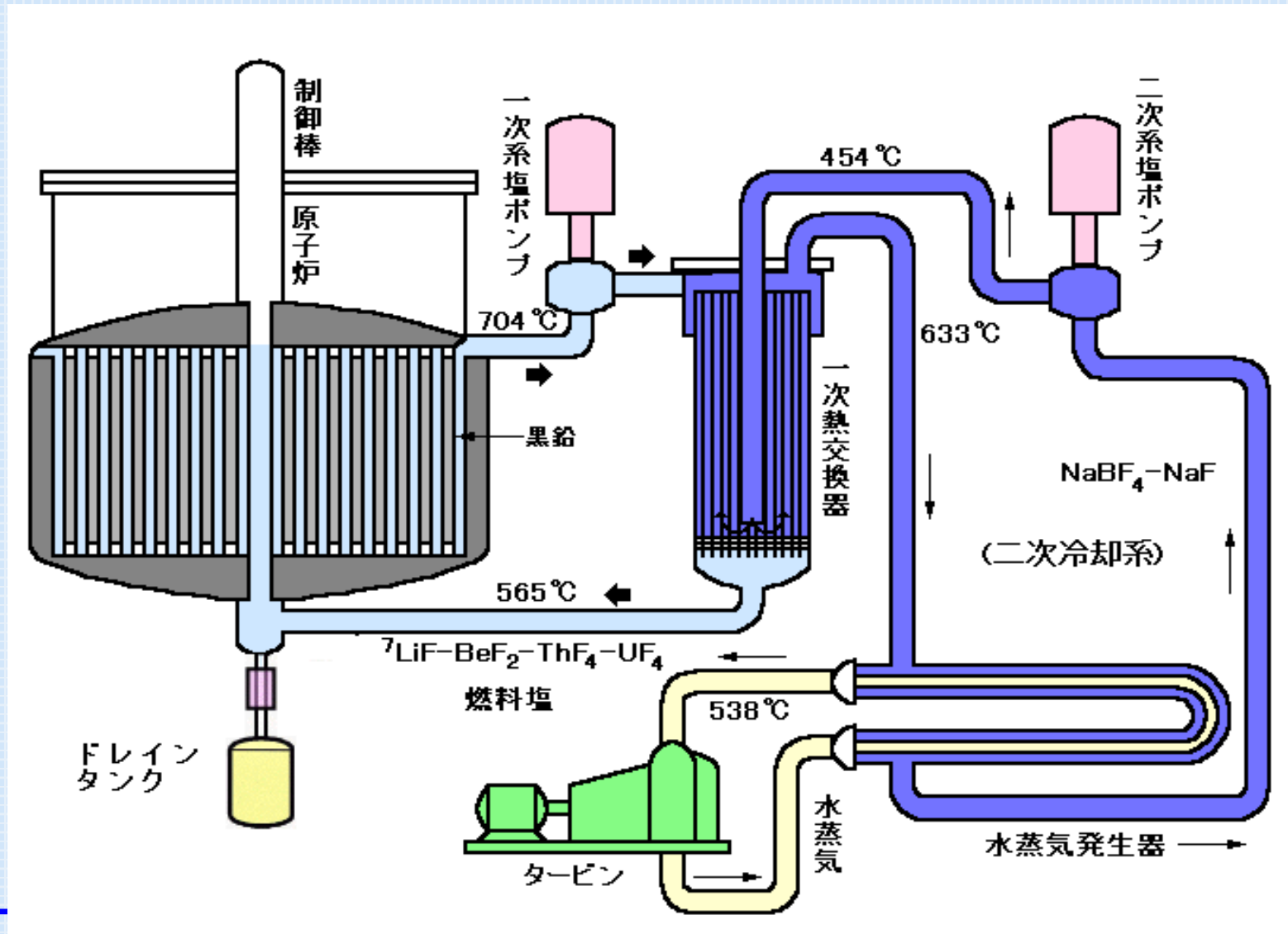
熔融塩炉は、フリーベ ($2\text{LiF}-\text{BeF}_2$) に、親物質としてトリウムと、核分裂性物質として少量のUまたはPuを含む混合塩を燃料とする液体燃料炉である。

燃料塩と黒鉛減速材で炉心を構成し、燃料塩自体を炉心外に循環させ、熱交換器を介して2次系に除熱し、更に、蒸気発生器によって発電用水蒸気を作る。



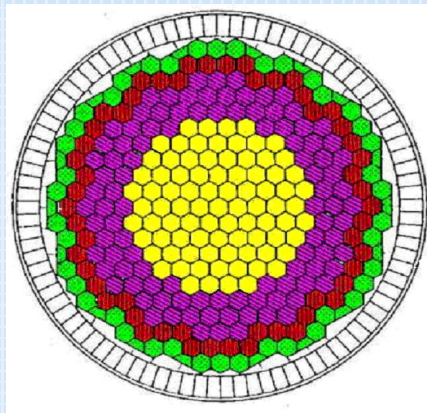
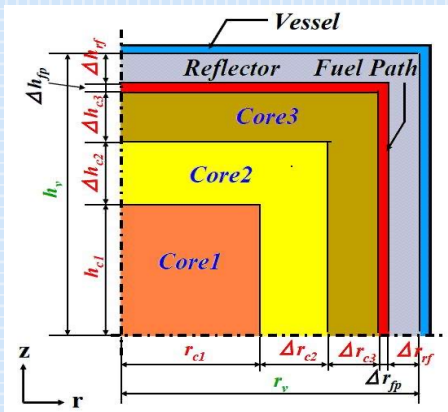
世界で数少ない解説本

熔融塩炉の概念図



熔融塩炉 FUJI 設計結果のまとめ

1	小型熔融塩炉FUJIと、100万KWeスーパーFUJIの概念設計がなされた。 FUJI-U3の ^{233}U 必要量は同一サイズのBWRの32%で済み、Pu生成量はBWR生成量の0.1%であり、超ウラン元素生成もBWRの4%である。
2	FUJI-U3はU233燃料を使用し、転換率1.0（自給自足）を達成できる。
3	FUJI-Puは、Pu燃料を起動用の核分裂性物質（火種）として使用でき、Puを消滅しつつ、エネルギーを生み出せる。
4	FUJIは超ウラン元素も消滅できる。
5	大量の熔融塩炉が必要な場合は、AMSB（加速器増殖施設）により、U233燃料を製造できる。



R. Yoshioka, K. Mitachi「Thorium Molten Salt Nuclear Energy Synergetic System」CMSNT-2013

熔融塩炉の特長① 高い安全性

1	熔融塩は化学的に安定で、かつ不活性である為、空気や水と激しく反応することはない、火災や爆発の危険性がない。
2	燃料塩は約500℃以上では液体で、照射損傷や燃料破損がない。
3	燃料塩の沸点は約1400℃と通常運転温度（約700℃）に比べ十分高く、また、蒸気圧も低い為、一次系の圧力の異常な上昇が起こらない。
4	熔融塩の流れる一次系、二次系は非常に低い圧力（5気圧程度）であり、高圧による熔融塩漏洩や系の破壊に至る事故の危険性がない。
5	一次系には水がないので、水蒸気発生による格納容器内の圧力上昇がなく、水素発生や水素爆発も起きない。
6	燃料塩は、必要に応じて凍結弁が開き、ドレインタンクに排出される。
7	福島事故のような電源喪失や冷却不全に対する防衛策は当初から盛り込まれている。

熔融塩炉の特長② 優れた経済性

1	炉心が黒鉛のみの単純な構造である。
2	液体燃料なので、燃料成型加工が不要である。
3	燃料交換が不要なので、連続運転が可能で、稼働率を高くできる。
4	燃料転換率が1.0近傍と自給自足でき、燃料経済性が優れている。
5	運転温度が約700℃と高いので、熱効率は44%と、軽水炉より3割高い。
6	代表的には10～30万kWeだが、100万kWeの大型や、2.5万kWeの超小型炉も提案されている。
7	U233-Thサイクルの他、プルトニウムや低濃縮ウランも燃料とできる。

熔融塩炉は福島事故にも安全か？

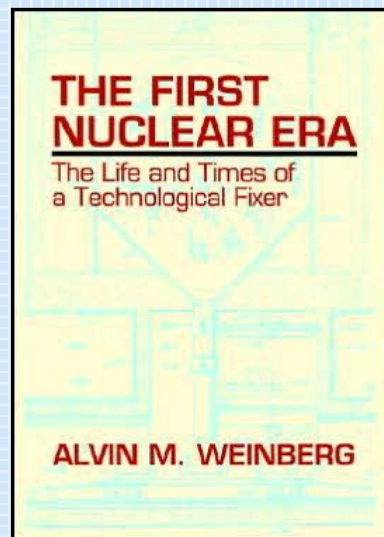
1	全電源喪失や炉心冷却停止が起きても、安全である。
2	熔融塩炉では、燃料破損は生じず、炉心熔融もない。
3	一次系に水はないので、圧力上昇は生じず、原子炉容器・格納容器が過圧によって破壊されることはない。従って、ベント(排気)も不要。
4	一次系には水もジルコニウムもないので、水素発生はなく、水素爆発はありえない。
5	使用済み燃料塩は専用のタンクに収容される。非常用のドレインタンクと同様に、動力を必要としない冷却系で冷却される。
6	地震や津波浸水に対する防衛策は軽水炉と同様に必須である。
7	最悪の事態でも、気体状の放射性物質は放出されず、殆どの放射性物質は燃料塩に留まる。

2011/10第7回研究会資料「熔融塩炉の安全性」より

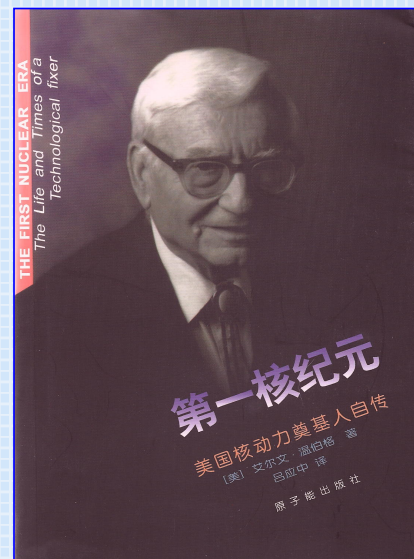
熔融塩炉はなぜ選択されなかったのか？

オークリッジ研究所長のアルビン・ワインバーグ博士の自伝等：

- ①当時、潜水艦に搭載された軽水炉が、陸上の発電炉用に先行した。
- ②原爆のために、U-Pu サイクルが先行した。
- ③Pu を使うための高速増殖炉の開発予算が付き、賛同者が多かった。
- ④熔融塩炉は、今までの原発と全く異なる概念で、理解者が少なかった。
- ⑤熔融塩炉では原爆用の Pu を生み出せないなので好まれなかった。



Alvin M. Weinberg
“The First Nuclear Era:
The Life and Times of a
Technological Fixer”
1994年



なぜ Thorium か？なぜ液体燃料か？
なぜ熔融塩か？（中国語訳1996年）

米国の事情

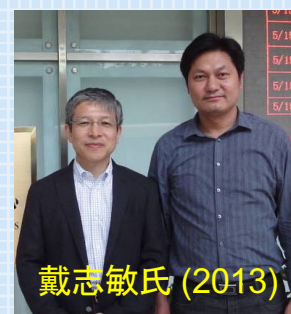
- ◆ 米国ではエネルギー資源は豊富
- ◆ 原爆用のプルトニウムも充分蓄積
- ◆ 1970 年時点では他の国に作らせないことが重要に
- ◆ 核拡散防止条約も絡んで新しい原子炉開発は停止
- ◆ 一方米国企業は軽水炉で儲けたい
- ◆ 熔融塩炉開発継続を主張したオークリッジのアルビン・ワインバーグは国立研究所所長として唯一の解任
- ◆ 海軍で原子力担当の経験があるジミー・カーター大統領は、その後日本に熔融塩炉開発を打診
 - ❖ 高速増殖炉に注力していた日本は躊躇
 - ❖ 原爆を必要としないはずの日本にはもっとも適した炉だった
- ◆ その後 2015 年から数百億円規模の予算が 14 のスタートアップ企業にもたらされており、例えばビルゲイツの会社も政府から投資を受けている



ワインバーグ氏と古川和男

中国と日本の熔融塩炉

- ◆ 2011 年 1 月から江沢民の息子の江綿恒氏指示で上海 (と蘭州) で再開発が始まった (SINAP)、米国・日本の考えをを実践している



- ◆ ほぼ同時に日本にトリウムテックソリューションというスタートアップ企業ができた (この分野世界初のスタートアップ)
- ◆ 一方日本では、もっと以前1980 年ごろ、議員連盟までできて土光敏夫氏を中心に動こうとしていたのに、停滞してしまった
- ◆ しかし、熔融塩技術、液体金属技術、高速増殖炉技術、などを持つ日本が、熔融塩炉に向けて果たす役割は大きい

出町讓 清貧と復興 土光敏夫100の言葉

た。それは、トリウム熔融塩炉。採用すれば、核の暴走を起こす恐れのある。この本によると、元東海大学教授でトリウム熔融塩国際フォーラム代表のルギーを出す軽水炉より、熔融塩炉の方がすぐれているとみていた。

トリウム熔融塩炉とはウランの代わりに、トリウムを燃料として使う。具を溶かして、エネルギーを取り出す手法だ。

最大の特色は、プルトニウムなどの放射性廃棄物をほとんど発生しない。ときに生成されるが、トリウムを燃やしても発生しない。このため、核兵器た、固体燃料を使う福島原発のような軽水炉と違って、燃料棒を交換する必も優れていた。

アメリカでは、一九六〇年代に、熔融塩炉の開発にメドが立っていた。オ転し、一時は核の平和利用の本命とみられていた。

しかし、アメリカはソ連との冷戦下であり、核兵器開発競争のさなか、ウかった。

六八年にオークリッジ研究所を視察、熔融塩炉の優位性を確信した古川はた。そこで古川は第一次南極越冬隊長だった西堀栄三郎に相談した。西堀は西堀はさっそく、ソニー会長、井深大に話をもちかけ、井深は、元東大総振興財団の理事をしていたが、古川構想実現のため、八一年に「トリウム学政界でも動きがあった。二階堂進を会長とし、一〇〇人規模のトリウム利代わるトリウム熔融塩炉が注目を浴び始めていた。しかし、科学技術庁、電入れることはなかった。

そこで茅は一案を講じた。東京高等工業（現在の東工大）の同級生の土光態は進展するとみられた。土光は茅の申し出を快諾した。

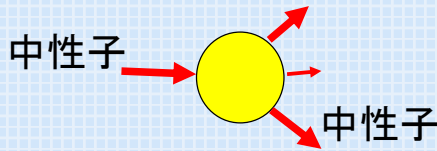
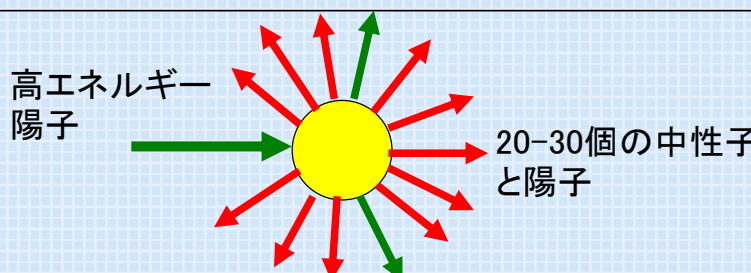
古川は「土光さんは本気だった。当時、茅さんと土光さんが組んだら最よ」と、土光の参戦が実現すれば、トリウム熔融塩炉が普及していた可能性

THORIMS-NES

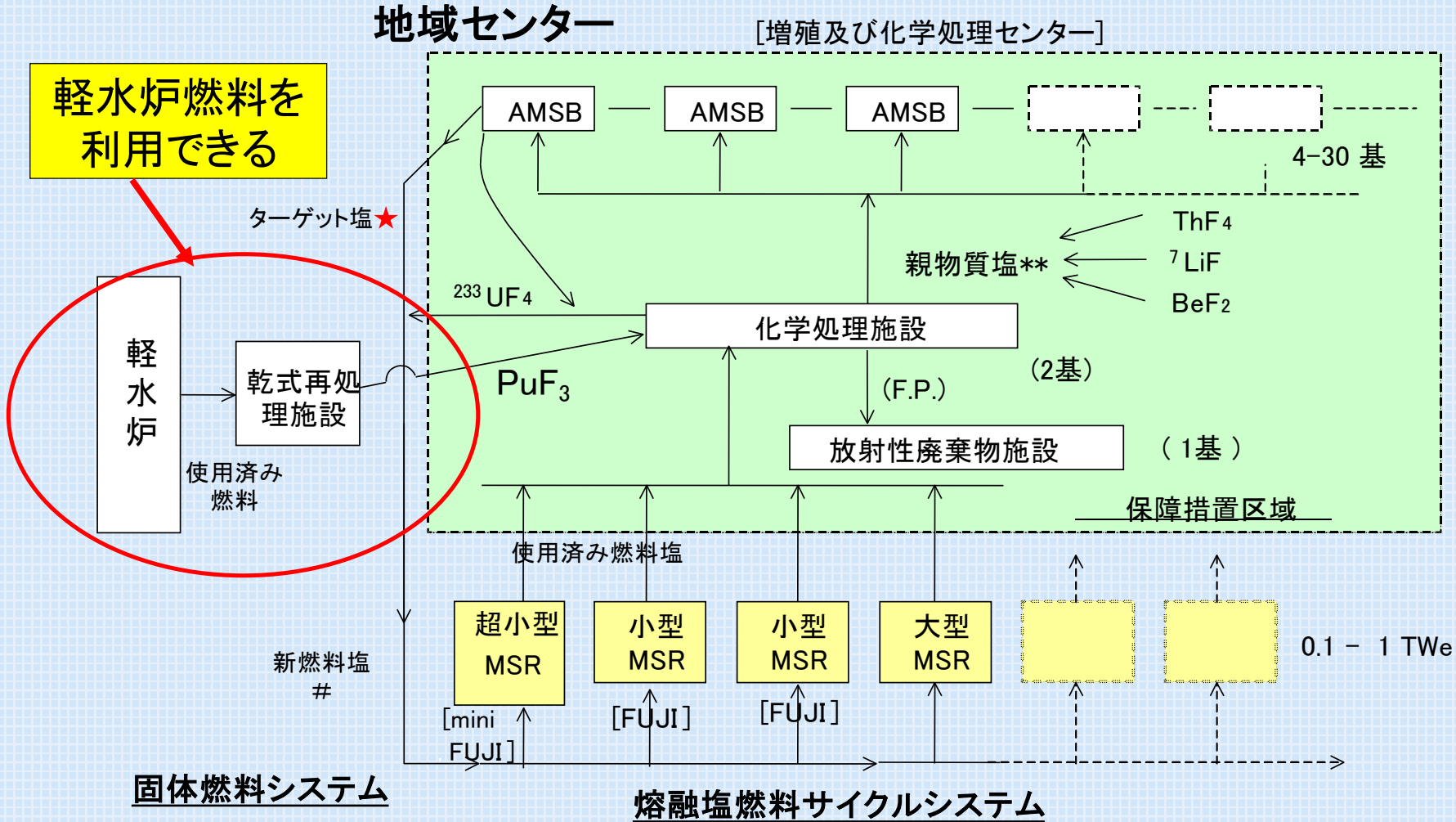
◆ THORium Molten-Salt Nuclear Energy Synergetic system (トリウム熔融塩 核エネルギー協働システム)

◆ 基本的な概念は 三つの原則 による：

- ❖ ①トリウムの利用
- ❖ ②熔融弗化物燃料の利用
- ❖ ③発電(FUJI)と燃料製造(AMSB)の組み合わせ(下図)

発電(原子炉FUJI)	燃料製造(AMSB)
大きな核分裂エネルギー (中性子発生は小)	大量の中性子発生 (エネルギー発生は小)
	

THORIMS-NESの概念図



★ ${}^7\text{LiF}-\text{BeF}_2-\text{ThF}_4-{}^{233}\text{UF}_4$

(**) ${}^7\text{LiF}-\text{BeF}_2-\text{ThF}_4$

(#)加速器ターゲット塩 + UF₄

まとめ

- ◆ 熔融塩炉は熔融塩を燃料かつ冷却材として利用する安全安心な原子炉
- ◆ 国内で長い歴史を持ち、海外でも注目を集めている
- ◆ 単純な構成のためコスト的にも有利
- ◆ 軽水炉も含めた燃料サイクルの構想が作られている
- ◆ 今後のエネルギー資源としてポテンシャルが高い

