

# エネルギー安全保障における 加速器技術の応用

## — 小型加速器から始めるトリウムエネルギーシステム —

古川 和朗<sup>1, 2, 3)</sup>, 内藤 富士雄<sup>1)</sup>, 木下 幹康<sup>2, 3)</sup>,  
澁谷 泰蔵<sup>4)</sup>, 吉岡 律夫<sup>4)</sup>

- 1) 高エネルギー加速器研究機構 (KEK),
- 2) トリウムテックソリューション (TTS),
- 3) トールゲートエネルギー (TGE),
- 4) トリウム熔融塩国際フォーラム (ITMSF)

## ◆背景

## ◆トリウム熔融塩炉

❖Thorium Molten Salt Reactor (MSR)

## ◆加速器熔融塩増殖炉

❖Accelerator Molten Salt Breeder (AMSB)

## ◆トリウム熔融塩核エネルギー協働システム

❖THORIMS-NES

## ◆段階的開発：小型中性子源から大型AMSBへ

❖複数の可能性を検討

✧熔融塩炉の実現に並行して開発を始める

## ◆まとめ

# 背景：国際社会における日本

- ❖ 私のつたない知識では
- ◆ 先人の努力によって、日本は最強のパスポートを手に入れている
  - ❖ しかし、世界には単純ではない事情を抱える国も多い
- ◆ 平和であるべき日本は、世界にも平和をもたらしたい
  - ❖ 紛争の多くは資源や水の争い、エネルギーが解決できる紛争も多い
- ◆ 一方、資源のない日本は、世界の国々と交渉して資源を入手
  - ❖ 化石燃料（石炭、石油、天然ガス）の地域偏在
- ◆ リスク分散のために、資源入手先の多様化が必須
- ◆ エネルギー安全保障
- ◆ 次世代原子力の可能性の検討
  - ❖ コスト、安全性、社会的受容性なども考慮

# 電気料金の例

2021年の10円/kWh以下から2023年の24円/kWh

Seriously High electricity cost

24

10

2021

2023

特別高圧の電気代推移（全国平均、円/kWh）



KEK will give top priority to SuperKEK B runtime

10% increase in this year

Factor 2.5 higher than Run1

Belle2 group kindly accepts that runs put into one (Autum/winter)

Also We can not predict what happen in this year

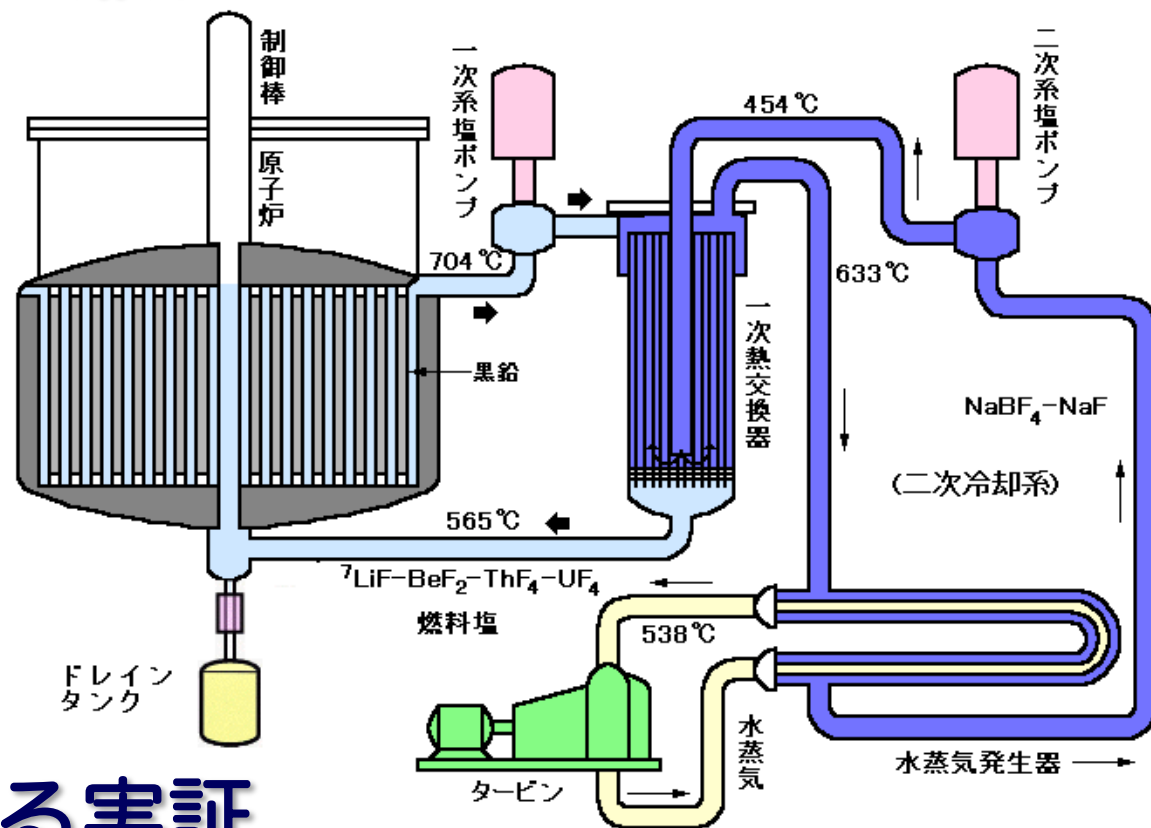
We fix the price as the same as 2024

- 1) Russia
- 2) Gaza
- 3) Trump 2.0



# トリウム熔融塩炉

- ◆ 液体燃料
- ◆ 熔融塩が燃料と冷却材を兼ねる
- ◆ 黒鉛減速材
- ◆ 低圧運転
- ◆ 高温熱利用
- ◆ 炉外燃料処理の簡素化



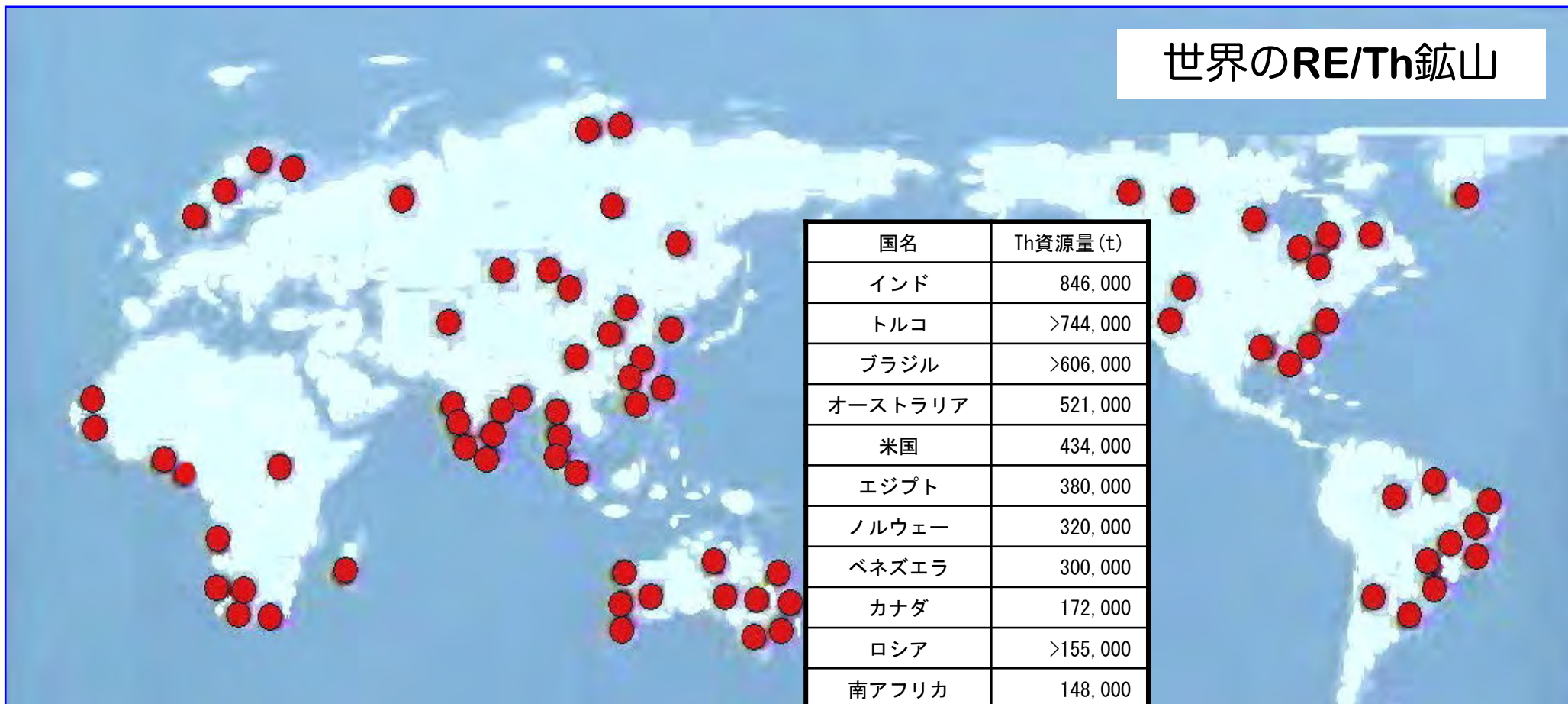
- ◆ 1960年代：MSREによる実証
- ◆ 近年、再び世界的に開発

## なぜトリウムか

- ◆ ウランより豊富な資源量
- ◆ 比較的広い地域に分布
- ◆  $^{232}\text{Th}$  を親物質として
- ◆ 中性子照射により
$$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$$
- ◆ 核分裂性物質  $^{233}\text{U}$  を生成できる
- ◆ トリウム燃料サイクルの可能性

# 世界のトリウム資源

## 世界のRE/Th鉱山



| 国名      | Th資源量 (t)    |
|---------|--------------|
| インド     | 846, 000     |
| トルコ     | >744, 000    |
| ブラジル    | >606, 000    |
| オーストラリア | 521, 000     |
| 米国      | 434, 000     |
| エジプト    | 380, 000     |
| ノルウェー   | 320, 000     |
| ベネズエラ   | 300, 000     |
| カナダ     | 172, 000     |
| ロシア     | >155, 000    |
| 南アフリカ   | 148, 000     |
| 中国      | >100, 000    |
| C I S   | 1, 500, 000  |
| その他     | 504, 000     |
| 世界合計    | >6, 730, 000 |

OECD NEA & IAEA,  
“Uranium 2011”

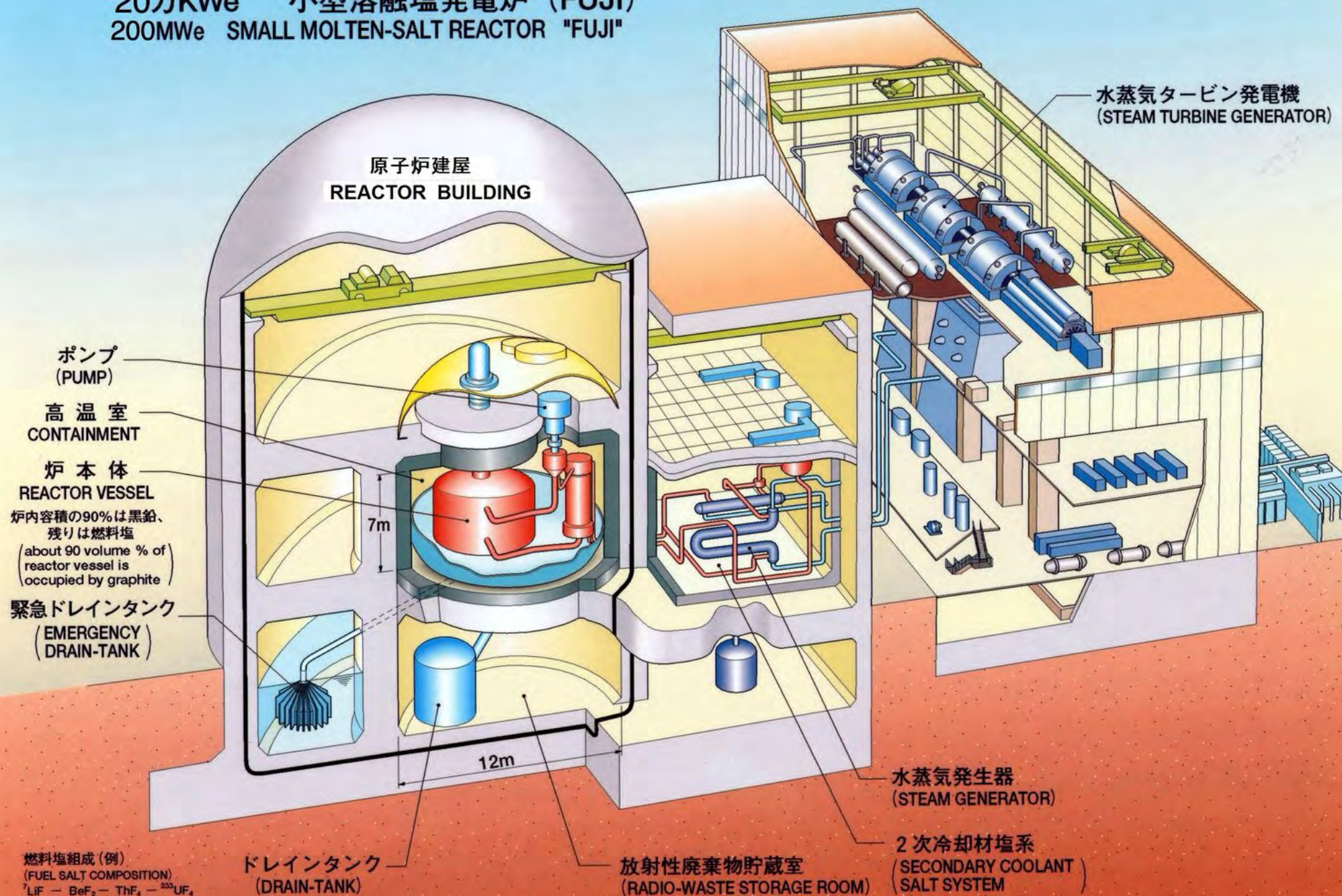
レアアースの副産物（年間10万トンのREの約1割がTh）  
1万トンのTh=100万KWeの原発1万基

# 危険のない原子炉を求めて

- ◆ 燃料、減速材、冷却材の組み合わせは非常に多い
- ◆ 液体燃料だけでも水溶液も含むさまざまな可能性を検討
- ◆ もっとも“安定”なイオン結合物質に注目
- ◆ 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
- ◆  ${}^7\text{LiF} - \text{BeF}_2 - \text{ThF}_4$  (少量の  $\text{UF}_4$ ,  $\text{PuF}_4$  を含めてもよい)
  - ❖ 融点 $459^\circ\text{C}$ 、沸点 $1430^\circ\text{C}$ 、約  $700^\circ\text{C}$  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  ${}^{232}\text{U}$  ができて  $2.6\text{ MeV}$  ガンマ線を発生、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 (ORNL) で熔融塩炉も発明、4 年間 (1965-1969) 実験炉 (MSRE) を無事故で運用

# 国内での熔融塩炉の設計例

20万KWe 小型熔融塩発電炉 (FUJI)  
200MWe SMALL MOLTEN-SALT REACTOR "FUJI"



# トリウム熔融塩炉の燃料と初動燃料

## ◆ $^{232}\text{Th}$ は自然界に豊富

↳ 中性子吸収

↳  $^{233}\text{Th}$

↳  $\beta^-$  崩壊

↳  $^{233}\text{Pa}$

↳  $\beta^-$  崩壊

↳  $^{233}\text{U}$  (核分裂性)

## ◆ 一度熔融塩炉が起動されれば上の反応が継続

## ◆ では初動燃料は？

❖  $^{235}\text{U}$ 、 $\text{Pu}$ 、別に製造した  $^{233}\text{U}$ 、などの可能性

# THORIMS-NESの考え方

## ◆燃料を「作る」施設と「使う」施設の分離

### ❖多数のトリウム熔融塩炉

- ❏発電

- ❏ $^{233}\text{U}$  を消費

### ❖少数の大型AMSB (加速器施設)

- ❏ $^{233}\text{U}$  を集中的に生産

- ❏化学処理施設

### ❖燃料サイクル

## ◆THORIMS-NES

❖AMSB →  $^{233}\text{U}$  → MSR群 → 使用済燃料塩処理 → AMSB/MSR

## 地域センター

[増殖及び化学処理センター]


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

(#)加速器ターゲット塩 + UF<sub>4</sub>

# Accelerator Molten Salt Breeder AMSB

## ◆ 加速器熔融塩増殖炉

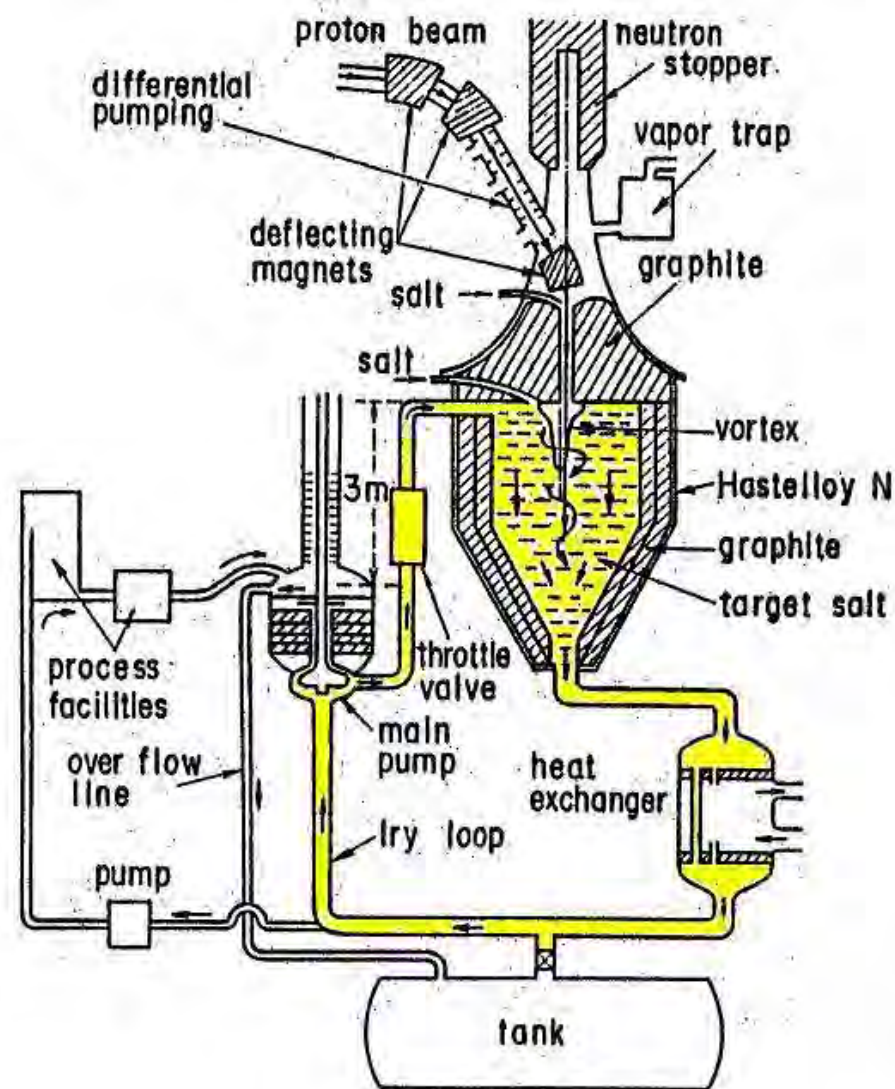
- ❖ 高エネルギー陽子加速器
- ❖ 核破砕中性子
- ❖ 熔融塩ターゲット・ブランケット
- ❖  $^{232}\text{Th}(n,\gamma) \rightarrow ^{233}\text{Pa} \rightarrow ^{233}\text{U}$
- ❖ MSR用燃料の生産

## ◆ AMSB = 加速器 + 熔融塩 + 燃料増殖

# AMSB

## ◆ THORIMS-NESの大型AMSB

- ❖ 陽子エネルギー：1 GeV
- ❖ ビーム電流：300 mA
- ❖ ビーム出力：300 MW
- ❖ 中性子発生量： $\sim 7 \times 10^{19}$  n/s
- ❖ 大型加速器
- ❖ 高出力ターゲット
- ❖ 熔融塩ブランケット
- ❖ 核化学処理
- ❖ 遠隔保守



## ◆ いきなり開発するには規模が大きい

- ❖ ビーム損失、ビーム窓、ターゲット、材料、熔融塩化学、燃料回収

# 段階的AMS<sup>B</sup>開発

- ❖ 小型中性子源
- ❖ トリウム核変換の確認
- ❖ 熔融塩中の核種挙動
- ❖  $^{233}\text{Pa}$ ・ $^{233}\text{U}$
- ❖ 核化学処理
- ❖ ターゲット技術
- ❖ ブランケット技術
- ❖ 徐々に中性子強度を増加
- ◆ 完成形AMS<sup>B</sup>を最初から目指さないという方策
  - ❖ 並行して熔融塩炉開発は $^{235}\text{U}$ やPuで行っておく
  - ❖ では、小型中性子源の候補は

## 候補1：電子加速器

### ◆電子線形加速器やRhodotron

- ❖ 比較的実績のある技術
- ❖ 高電流電子ビーム
- ❖ 重金属ターゲット
- ❖ 制動放射
- ❖ 光核反応
- ❖ 光中性子源
- ❖ 初期の核変換実験
- ❖ 小規模・低リスク開発
- ❖ 電子  $\rightarrow$   $\gamma$  線  $\rightarrow$  中性子  $\rightarrow$   $^{232}\text{Th}$

## 候補2：陽子Linac

### ◆高電流陽子線形加速器の利用

- ❖ BNCT用加速器技術
- ❖ 数MeV～数10 MeV
- ❖ ベリリウムやリチウム標的で (p,n) 反応
  
- ❖ 高デューティー化、IFMIF/EVEDA LIPAc の技術
- ❖ 高平均電流化
- ❖ 常伝導：～5 MeV級
- ❖ 超伝導：10～40 MeV級へ
- ❖  $10^{13} \rightarrow 10^{17}$  n/s

## 候補3：サイクロトロン

### ◆コンパクトな高電流加速器

#### ❖Cyclotron

- ◆例えば、素粒子実験でノーベル賞を受賞したカルロ・ルビアは、自身の粒子検出器開発での経験からトリウムを利用するエネルギー変換システムを提唱し、その際にサイクロトロンの利用を狙った

- ✧数10 MeV級

- ✧ $H_2^+$ 加速＋ストリッピング

- ✧60 MeV・10 mAの構想

#### ❖dCARA

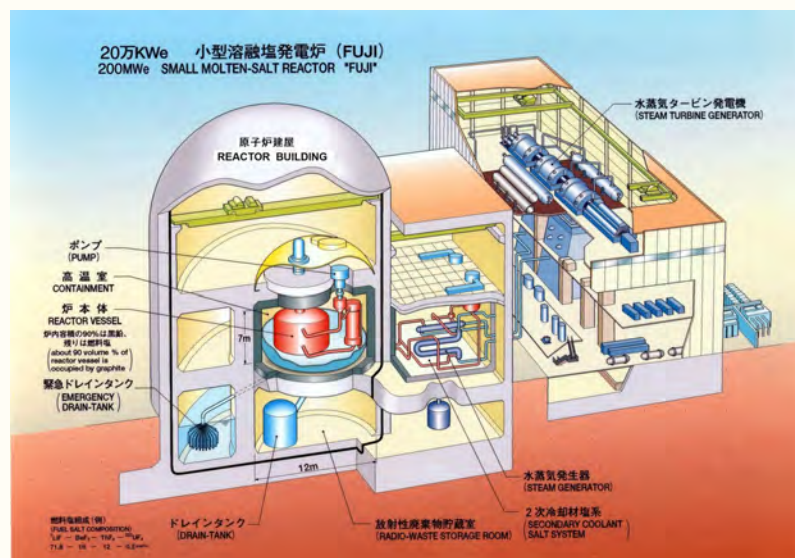
- ◆サイクロトロン共鳴条件を維持しながら高電流ビームを加速する新しい加速器概念

- ✧40 MeV・125 mA・5 MWの設計研究

- ✧新しい開発経路

## まとめ

- ◆ トリウム熔融塩炉を支える燃料サイクルの実現
- ◆ AMSBを含むTHORIMS-NESの構想
- ◆ 段階的開発のために
- ◆ 小規模中性子源の可能性、その後開発の拡大
  - ❖ 技術的リスクの分散
  - ❖ 開発投資の段階化
  - ❖ 要素技術の逐次実証
- ◆ 最終目標：1 GeV・300 mA AMSB
- ◆ 脱炭素とエネルギー安全保障に資する可能性



ありがとうございました