

「熔融塩炉」の開発を巡る中国 と世界の情勢

2017年6月16日
山上会館

トリウム熔融塩国際フォーラム
木下幹康（東大・人工物）

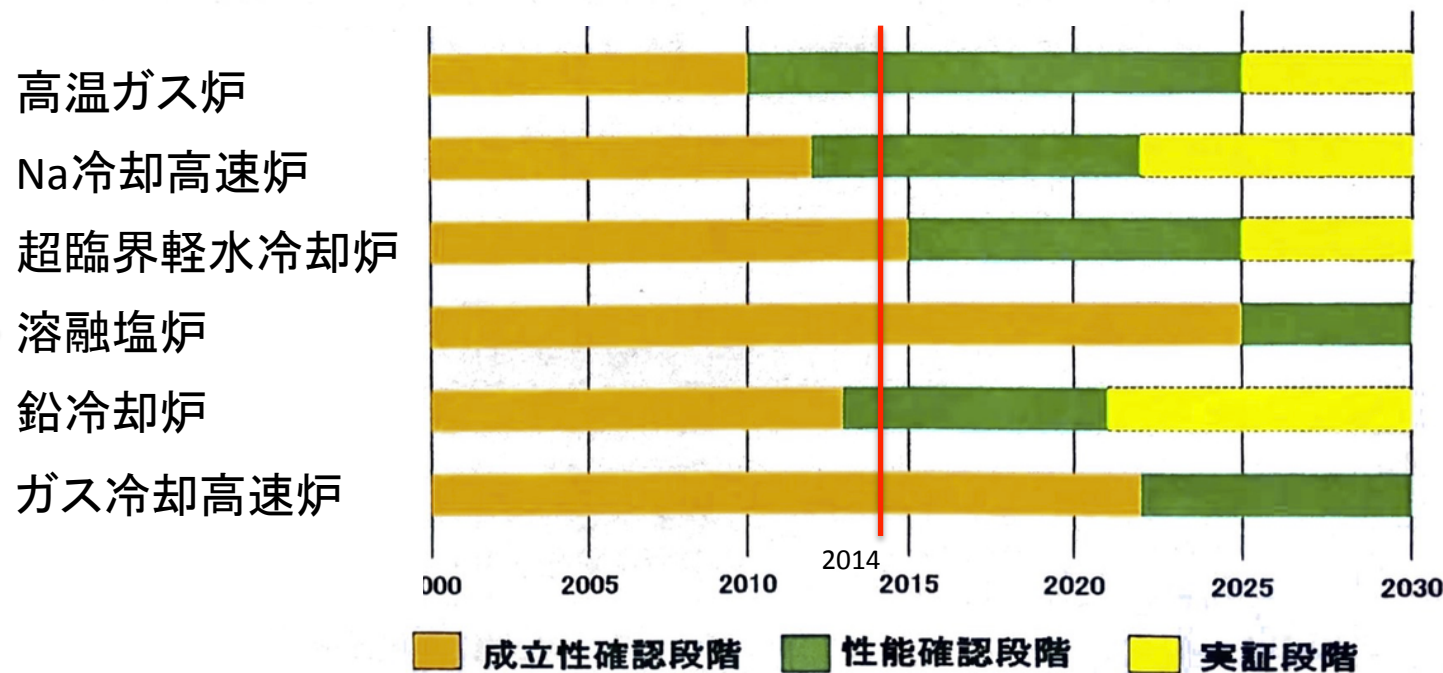
研究開発段階の区分と開発見通し

GIF 技術ロードマップ（2014 年 1 月改正）による
各システムの研究開発の進捗度と開発見通し（図 2）

- ① 成立性確認段階（Viability Phase）
- ② 性能確認段階（Performance Phase）
- ③ 実証段階（Demonstration Phase）

※GIF では実証段階前までの研究開発協力を実施

2014年の段階で
OECD/NEA（欧州・米国）
でまとめた
原子力業界の認識



各炉型の開発見通し

第三～第四～第五世代炉の比較

- 全体像を捉えるために、
議論されている世代炉の比較を行う。
 - 第一世代炉、初期の原型炉(1940年代～)
 - 第二世代炉、現行の軽水炉(1970年代(40年超))
 - 第三世代炉、改良型軽水炉(ABWR柏崎、APWR)
 - 第四世代炉、過去の経験から、4つの要件を満たす炉
 - 持続可能性、経済的成立、
 - 安全性、核不拡散への対応

原子力発電システム全体を俯瞰する

高速中性子炉	高速中性子炉以外の原子炉システム
1. ナトリウム冷却高速炉(SFR)	1. 高経済性単純化沸騰水型炉(ESBWR)
2. 重金属冷却高速炉(LFR)	2. 統合型加圧水型炉(IPWR)
3. ガス冷却高速炉(GFR)	3. 高温ガス炉(HTGR)
4. 溶融塩高速炉(MSFR) ←	4. フッ化物塩冷却高温炉(FHR, MSF-SF) ←
	5. 超臨界圧水冷却炉(SCWR)
	6. 溶融塩液体燃料炉(MSR-LF) ←
	7. 加速器駆動システム(ADS) (←)
	8. 核融合炉 (←)

核融合でも、LiF(リシウムのフッ化物)とLiPb(リシウム鉛の合金とが、トリチウム燃料を生産するのための、ブランケット(プラズマの周りに巻く毛布)として、開発・検討がされてきた。

熔融塩炉はなぜ遅れをとったか？

- 1960年代（から70年代）、原子力に対して、夢があったが、安全性や経済性の認識に、甘さもあったのではないか？
（水炉の著しい成功がある）
- 1960年代～1970年代の、当事者の気持ちを想像してみると・・・例えば、
 - － 液体燃料原子炉は、水溶液型で、故障したときに1年間修理にかかっている。（2010年代では1年間の戦列離脱は普通に起きていること）
 - ➔とても使えないという原子力業界の意識

第三～第四～第五世代炉の比較

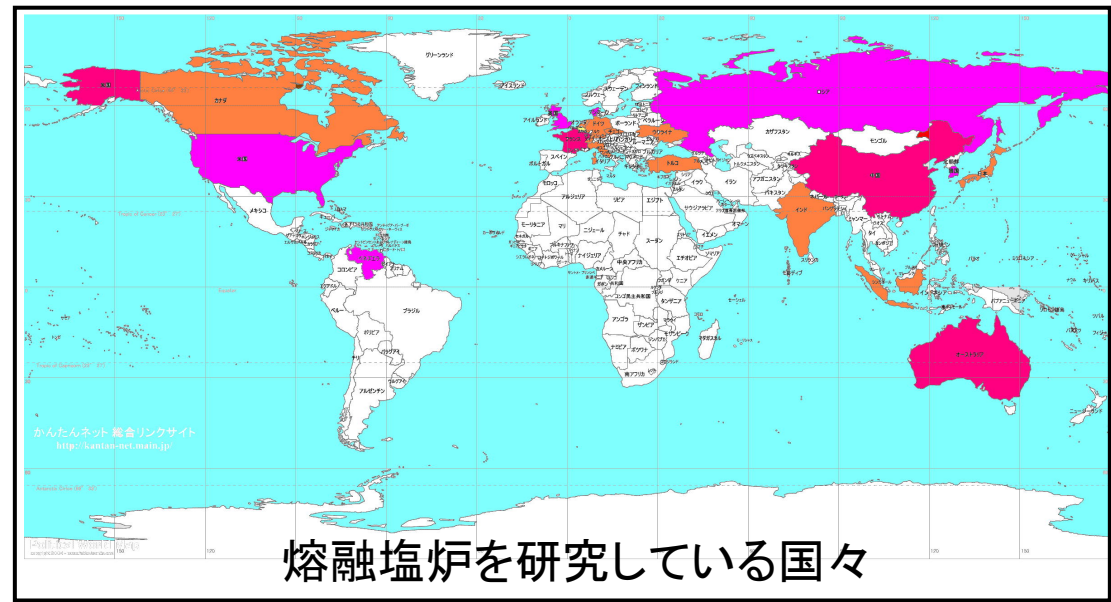
- 全体像を捉えるために、
議論されている世代炉の比較を行う。
 - 第一世代炉、初期の原型炉(1940年代～)
 - 第二世代炉、現行の軽水炉(1970年代(40年超))
 - 第三世代炉、改良型軽水炉(ABWR柏崎、APWR)
 - 第四世代炉、過去の経験から、4つの要件を満たす炉
 - 持続可能性、経済的成立、
 - 安全性、核不拡散への対応
 - 第五世代炉、(公的議論はまだ始まっていない)
 - 無人運転、被爆ゼロへの挑戦

IAEAの国際会合

題目「Technical Meeting on the Status of Molten Salt Reactor Technology」
場所:IAEA本部
日時:2016年10月31日～11月3日
参加:欧米各国、中印露、東南アジア等の発展途上国(約20ヶ国)。
日本:吉岡律夫(トリウム熔融塩国際フォーラム)が参加。

場所:IAEA本部

参加：欧米各国、中印露、東南アジア等の発展途上国（約20ヶ国）。



欧米の熔融塩炉ベンチャー

Terrestrial Energy	カナダ	民間+政府
TerraPower/Southern Co. グループ	米国	民間+政府
Transatomic Power	米国	民間
FLiBe Energy	米国	民間
ThorCon Power	米国	民間
THOREACT	米国	民間
Elysium	カナダ	民間
Copenhagen Atomics	デンマーク	民間
Moltex LLC	英国	民間(+政府)
Thorium Tech. Solution	日本	

米国GAINについて

2015年末に、米国エネルギー省（DOE）は、新型炉の商業化を促進するために「Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear (**GAIN**)」というプロジェクトを開始し、熔融塩炉、高温ガス炉、高速炉の3炉型を選定した。

<https://gain.inl.gov/SitePages/Home.aspx>

DOEの説明によれば「DOEは傘下の国立研究所の施設と設備を提供し、DOEとベンチャーと電力会社が協同パートナーとなり、新型炉の商業化を促進することが目的」とのことである。

この内、熔融塩炉については、2016年に2回のワークショップが開催され、ベンチャーとしては、TerraPower、Thorcon、Flibe Energy、Terrestrial Energy USA、Transatomic、Elysium Industriesの6社が参加した。

<https://public.ornl.gov/conferences/msr2016/presentations.cfm>

トランプ政権、ベンチャーの活力を最大化し、国内産業を育成siteiru
。

GAINのWGについて

GAINでは、熔融塩炉に関するWG（Technology Working Group）を結成して、今後の活動を進めることとしている。

WG委員は、前記のベンチャー6社の他に、Duke Energy、Exelon、Southern Companyの大手電力3社、EPRI（電力研究所）NEI（原子力協会）で、政府側とユーザー電力が一緒になって、米国ベンチャーの活動を支援している形になっている。

WGではベンチャー間の共通開発項目を抽出することとしている。
その一つが「燃料塩工学試験設備」で、過去半年間の検討結果をまとめ、2017年3月に提案をする予定。

GAINに基づき、DOEは2016年1月に予算支出を決定（次頁）。

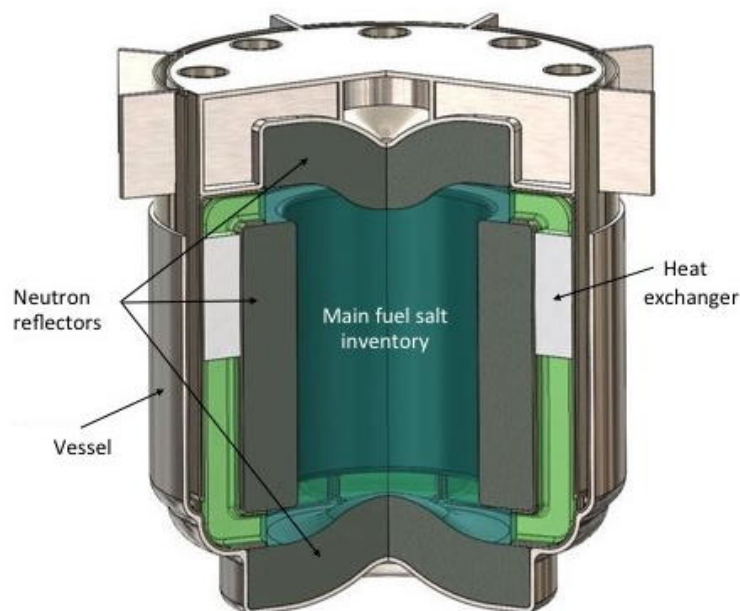


米国政府の支援

20116年1月に、米国エネルギー省は、熔融塩炉と高温ガス炉に各々\$40M（約40億円）の政府資金を出すことを決定した。（本年度は各々約6億円）

資金の受け皿が全米4位の電力会社で、米国電力研究所や ORNL（オークリッジ国立研究所）、TerraPower（ビルゲーツ子会社）も参加している。

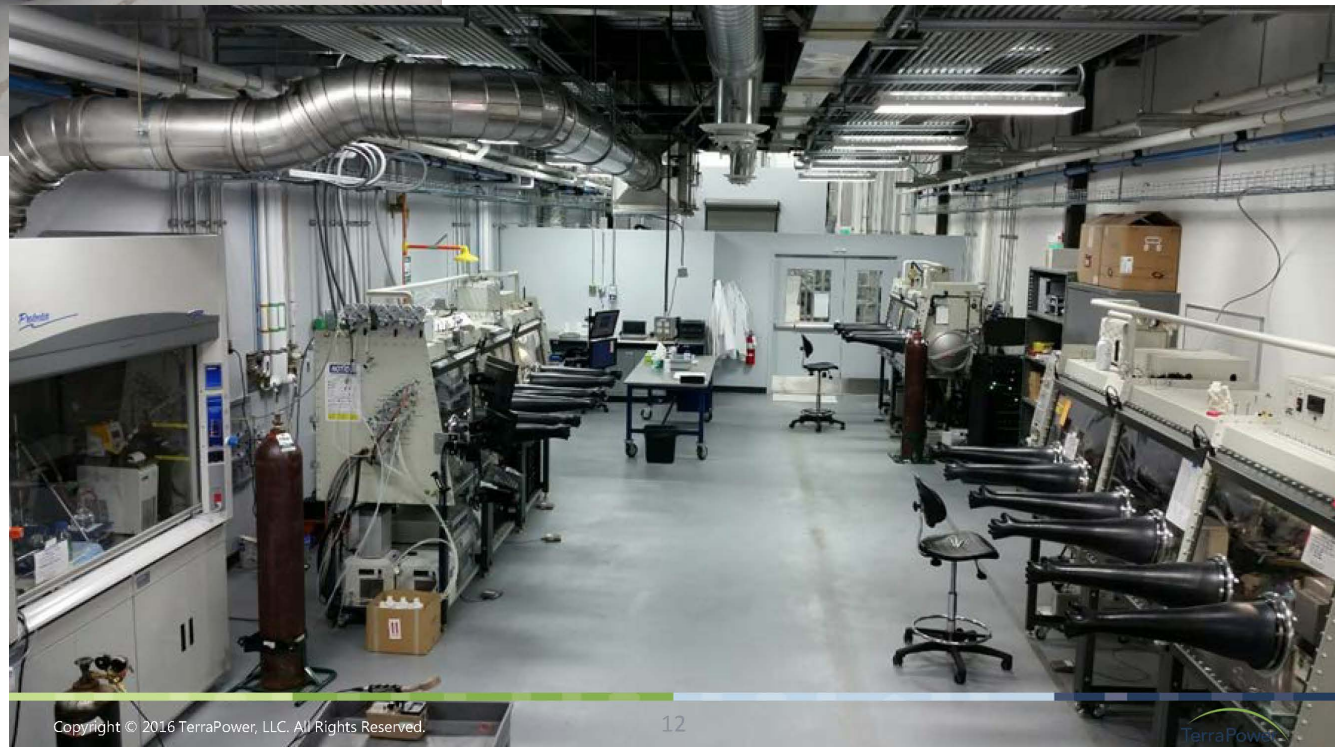
但し、従来研究されてきた弗化物ではなく、塩化物を使用している。
なお現時点では設計情報がなく、ポンチ絵のみ。



テラパワー社の熔融塩炉用試験設備



同社の説明では「現有の組立工場の隣に3000m²の実験建屋を作り、ループ試験等を行なう」としている。
(同社は元々、小型Na高速炉を開発していた)



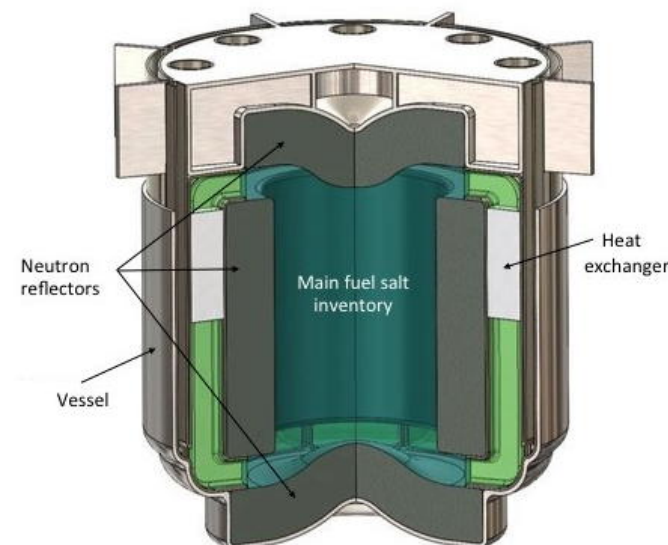
米国の最新状況

2016年、GAINプロジェクトで、「米国エネルギー省が、高温ガス炉と熔融塩炉に各々 \$40million (約40億円) の政府資金を出すことを決めた」(2016年度は各々約6億円)。

資金の受け皿が全米4位の電力会社で、米国電力中央研究所や ORNL (オークリッジ国立研究所)、ビルゲーツ子会社も参加している。

但し、従来研究されてきた弗化物ではなく、塩化物を使用している。

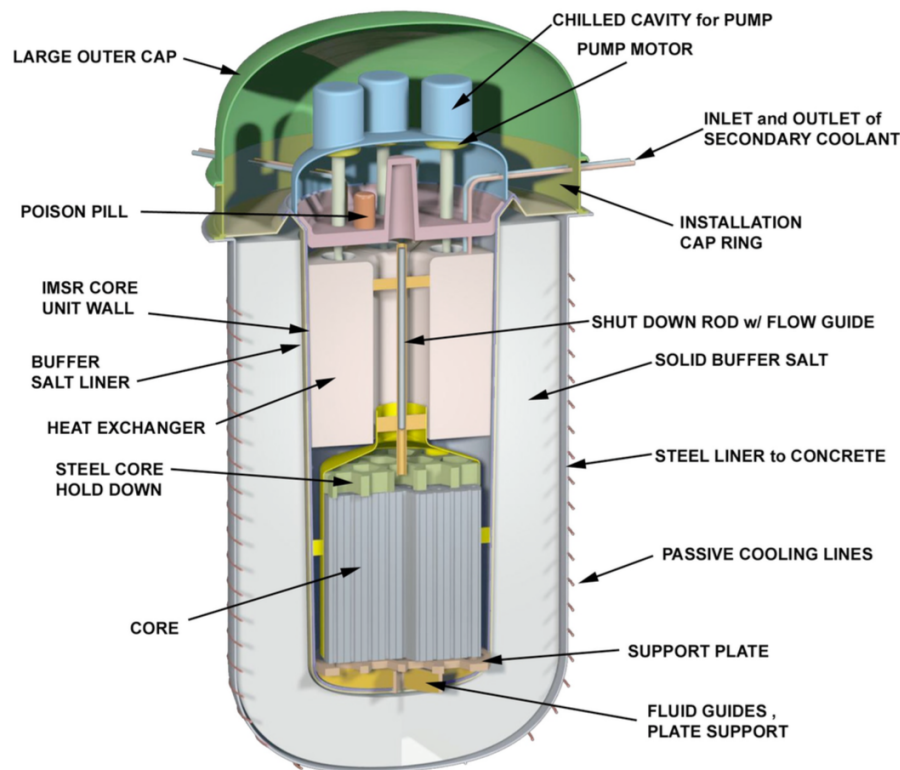
2017年、トランプ政権になり、SMR (水炉) の予算はゼロとなったが、GAINには、現時点 (2017, May) では削減の影響はでていない模様。



Terrestrial Energy社(カナダ)

統合型炉 I-MSR

頭頂部に熱交換器を配置

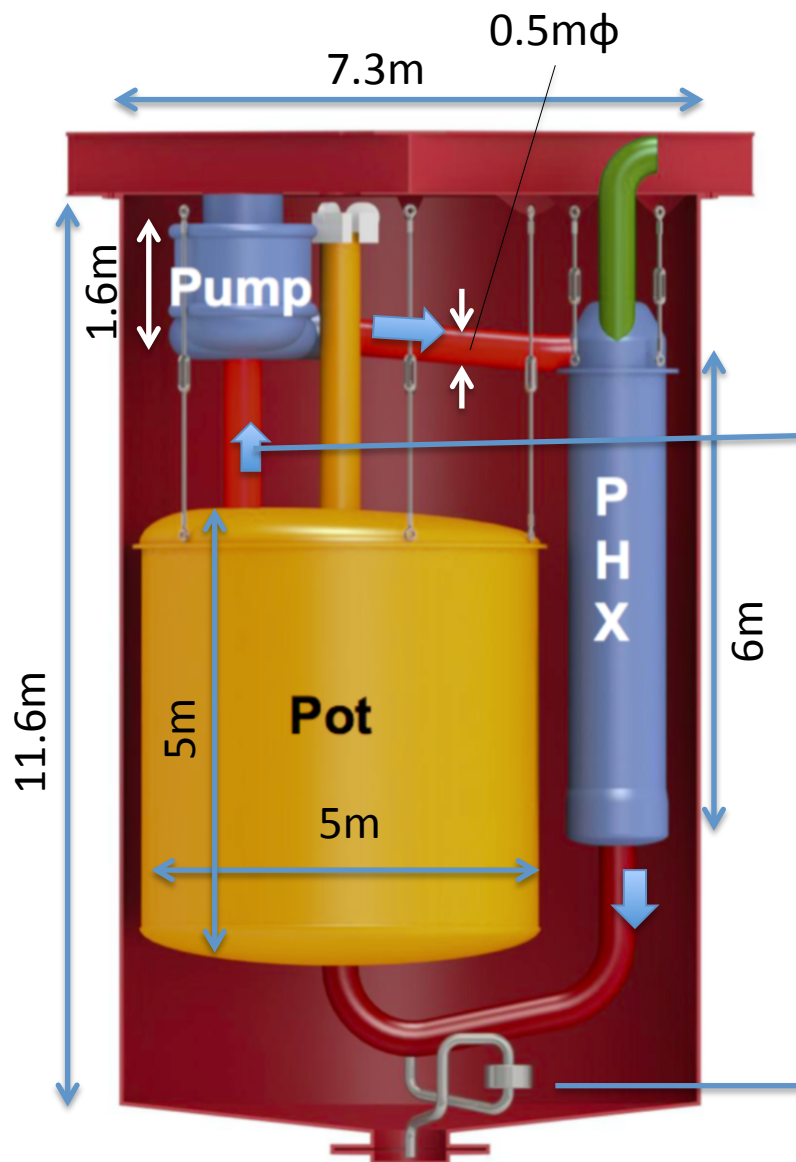


カナダの溶融塩炉開発ベンチャー
Terrestrial Energy社は、出資を募り、民間からCAD\$10M(8億円)を獲得。

カナダ原子力安全委員会に、概念設計のレビューを依頼。(安全審査の方式は米国と異なり、)

2016年3月に、カナダ政府の資金CAD \$5.7M(約5億円)を獲得し、この資金で、電気加熱の模擬原子炉の製作を発表

(SMR-conf. 2014)



ThorCon社 カプセル型設計

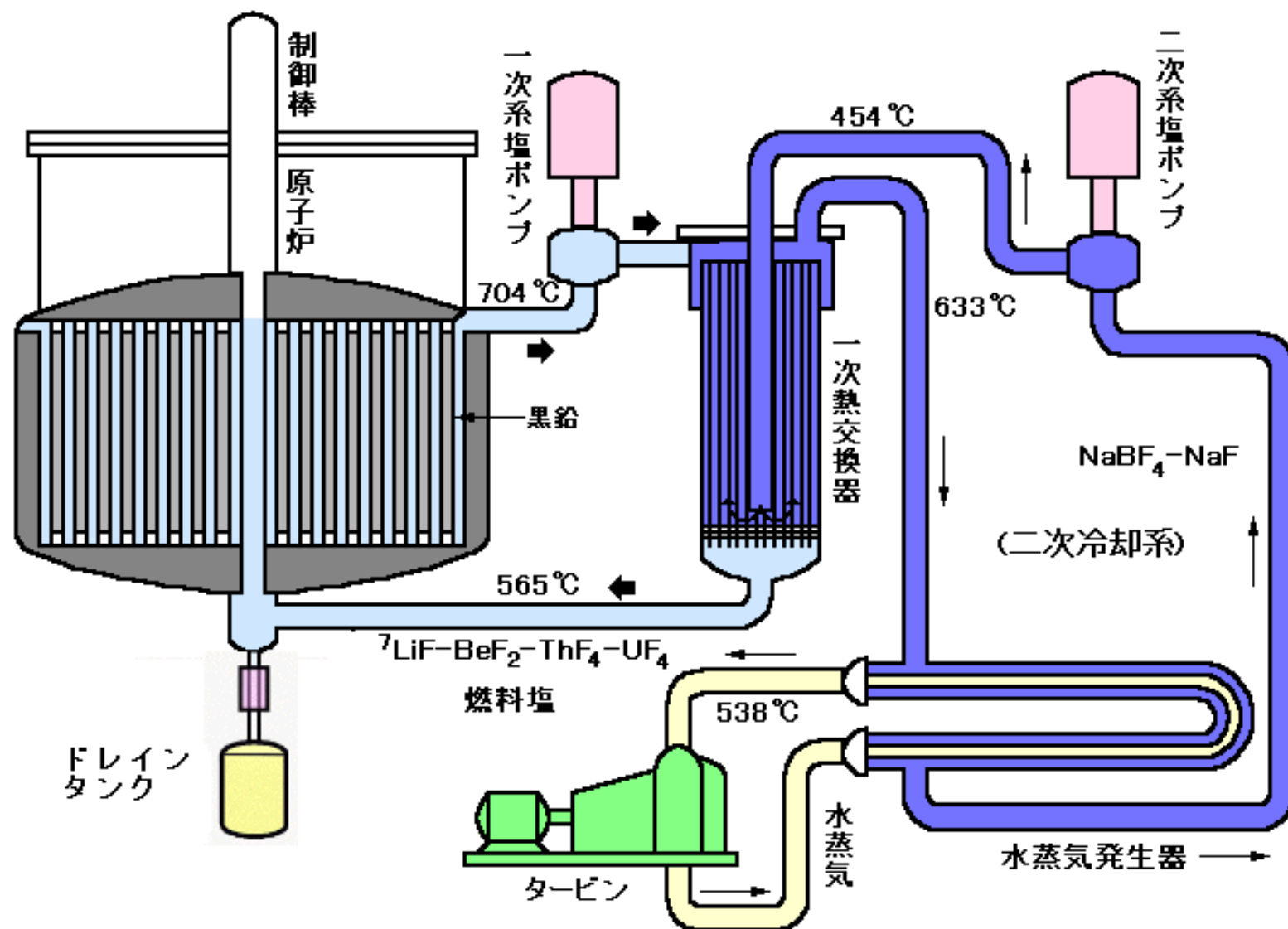
1つの缶、557MWth
(250MWe)

流れの方向

PHX: 一次系熱交換器
Pot: 炉心本体(グラファイト)

フリーズ・バルブ

熔融塩炉



中国の熔融塩原子炉開発の状況

2017年2月末

1. 建設・稼働スケジュールを2年ほど前倒しした。
2. 順調な進捗（但し当初計画より2年ほど遅れ）
 - 実機の原型システム（電気加熱）、発注済み。
 - 2017年8月に組み立て開始、12月末に稼働予定。
3. 実機原子炉（核反応での発熱）の立地点を確定（山東半島）
4. 中央政府の許認可に向け、着実な前進

中国SINAP 熔融塩実験炉の建設計画

中国・山東省・海陽市に、SPIC(国家電力投資集団、AP1000を建設中)が、未使用敷地(標準炉約8基建設可能)に熔融塩実験炉2基(熔融塩冷却 固体燃料炉と、熔融塩液体燃料炉)を建設する計画を2016年3月に公表。



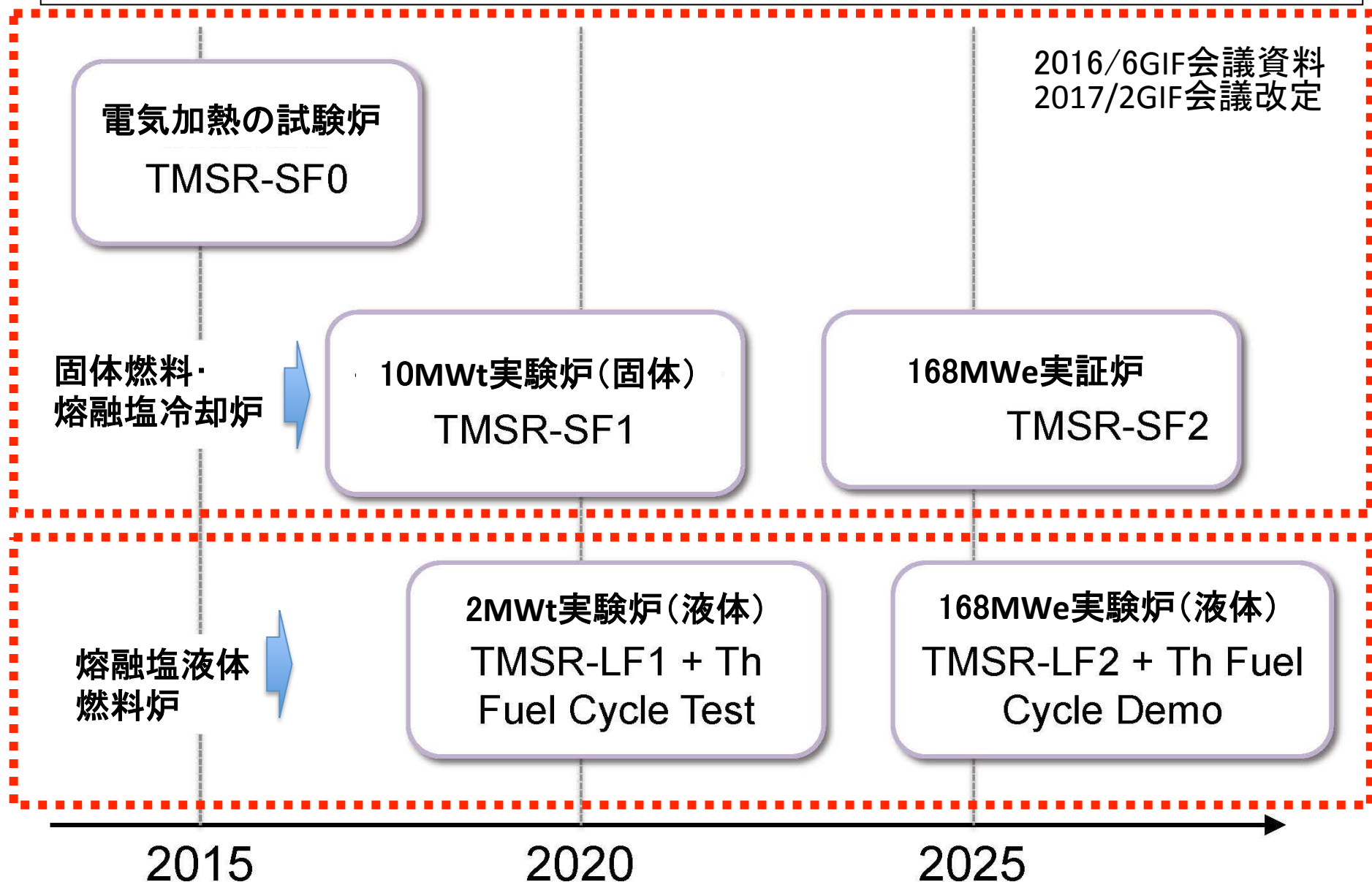
山東省・海陽市

青島市



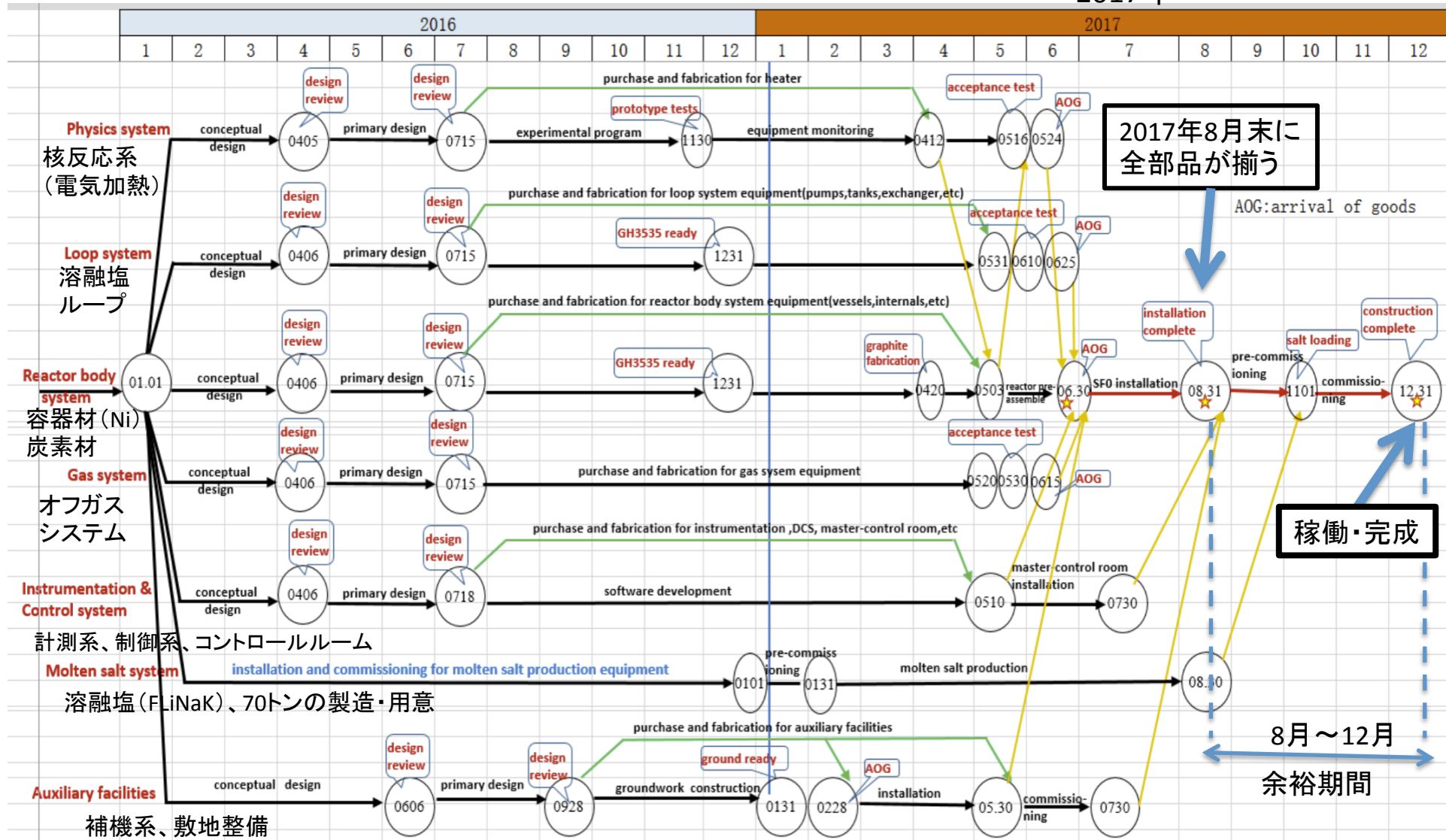
上海応物研SINAPとSPICの調印式

中国の開発計画

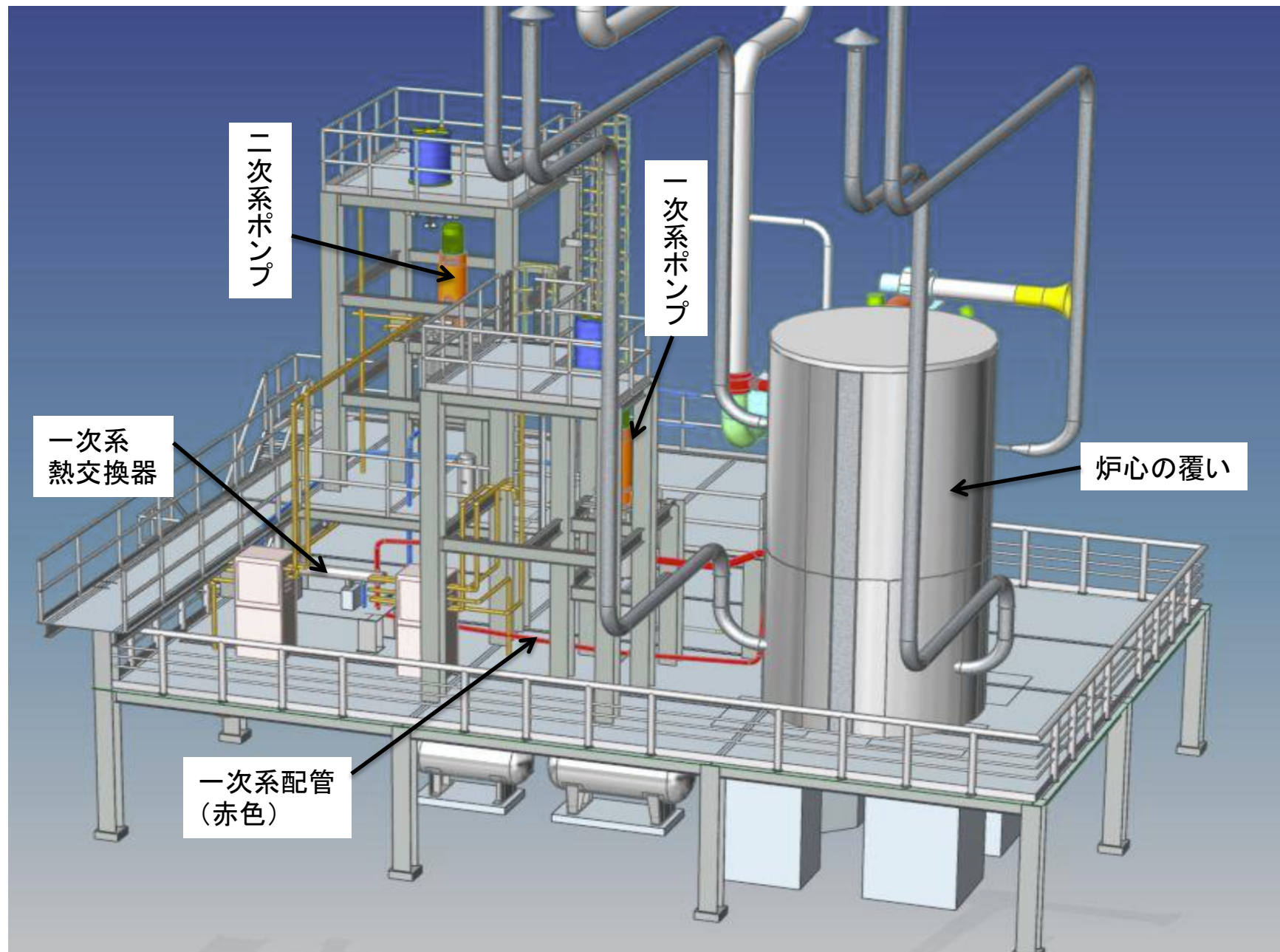


中国溶融塩炉(電気加熱モデル)建設稼働スケジュール

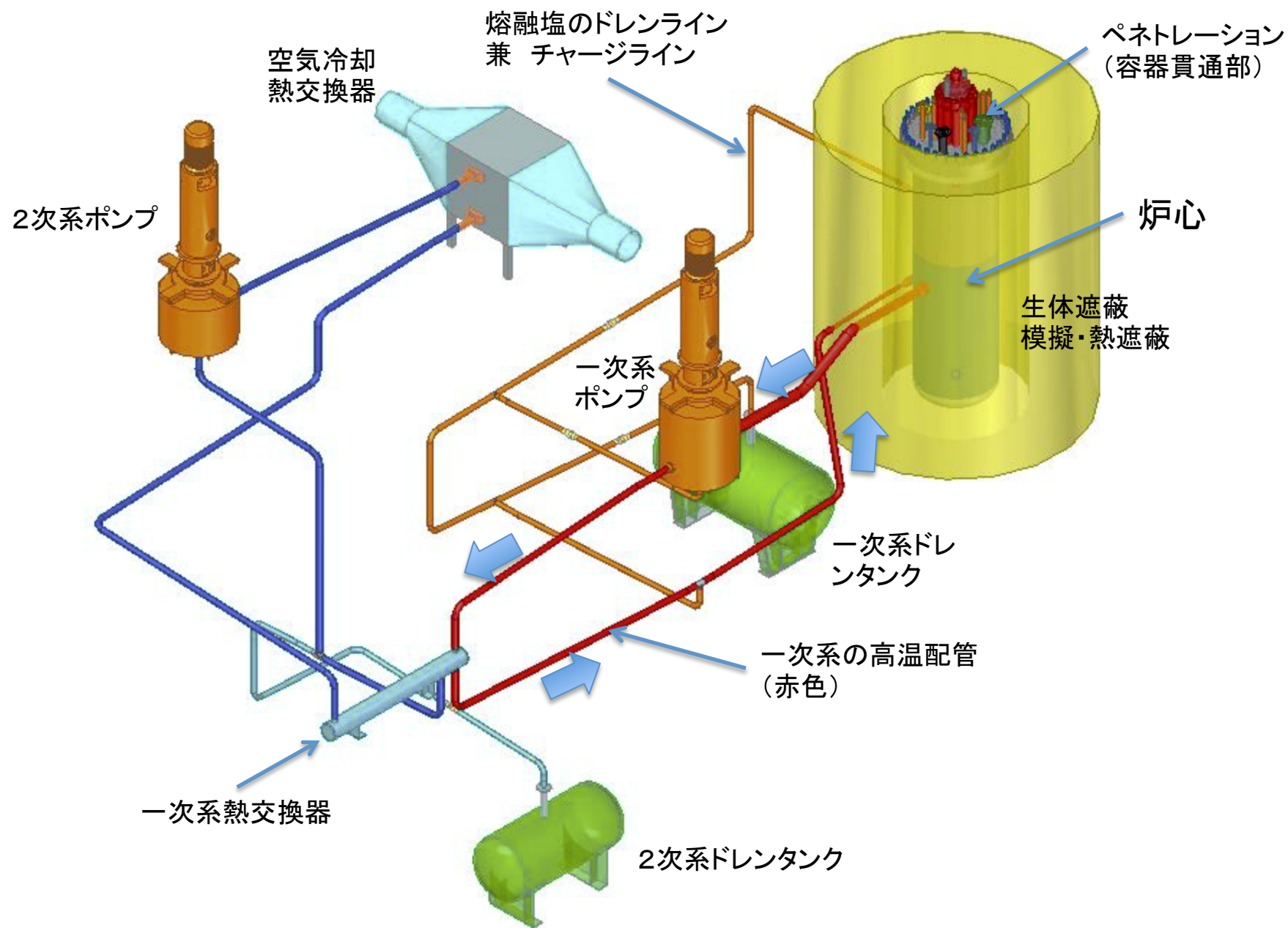
2017年



電気加熱・溶融塩炉プロトタイプ(2MWt級)完成予想図

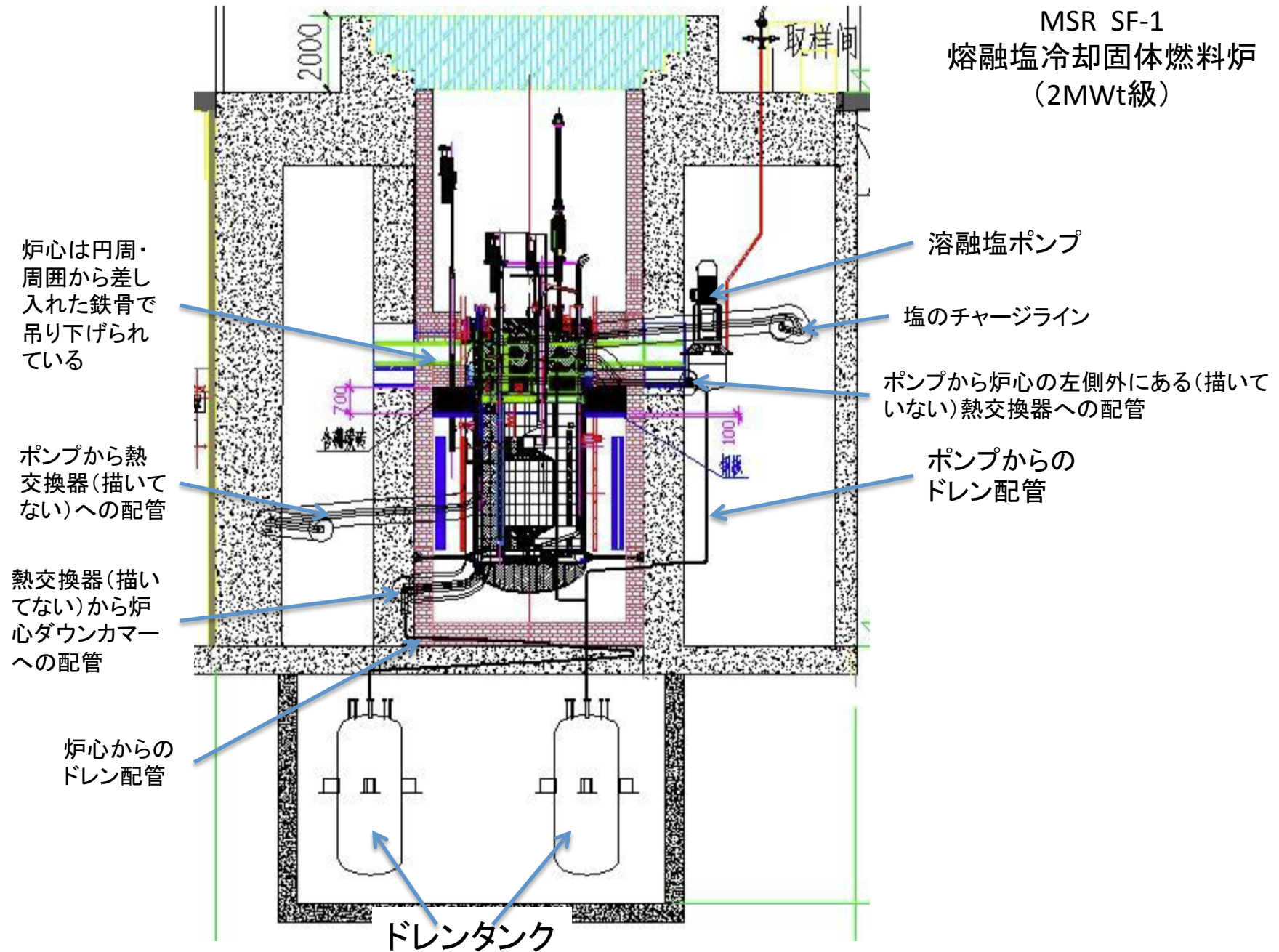


2017完成予定 熔融塩炉 電気加熱モデルのシステム図

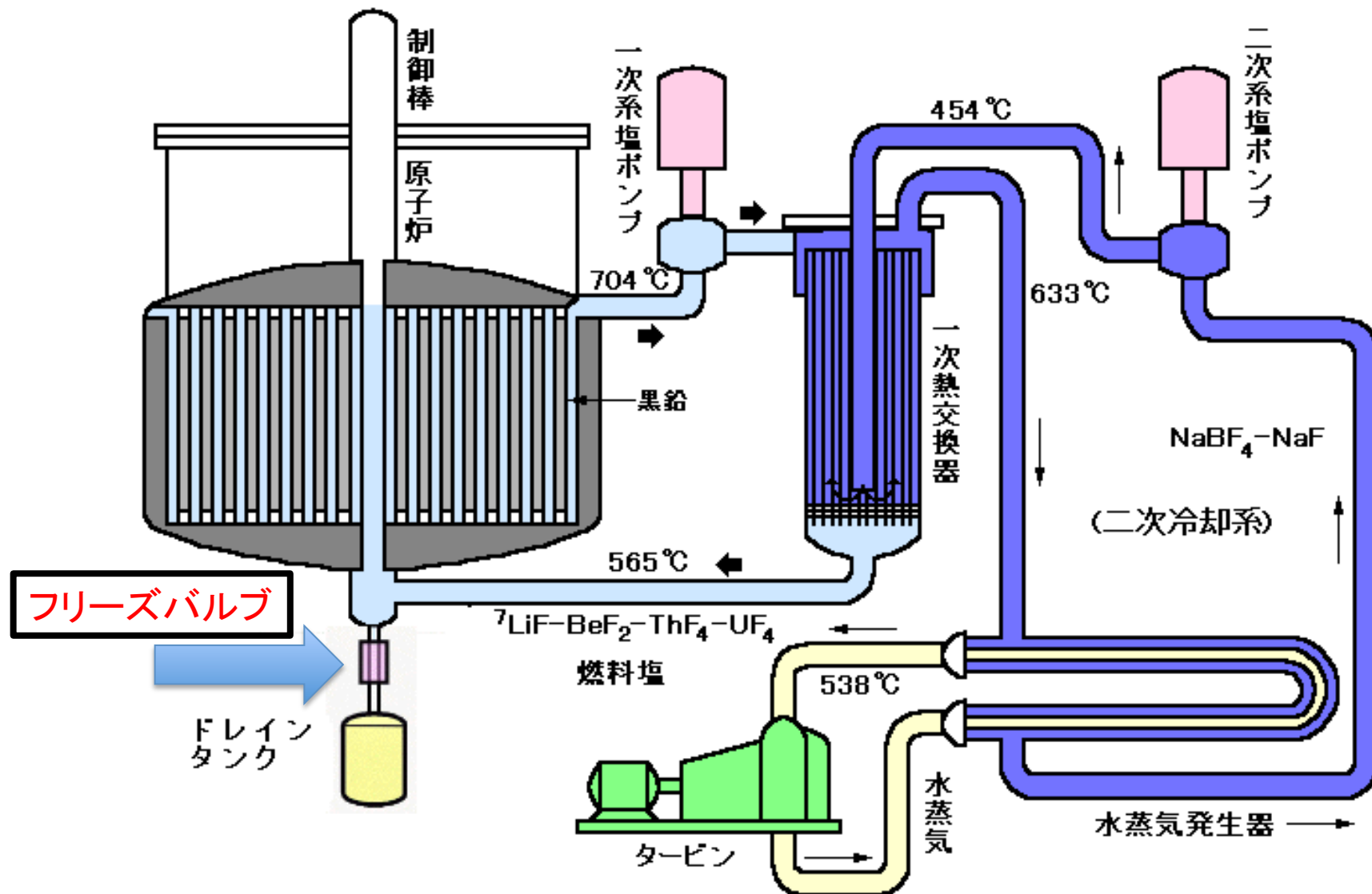


原子炉の設計

MSR SF-1
熔融塩冷却固体燃料炉
(2MWt級)



熔融塩炉



熔融塩炉安全性のキーとなる 熔融塩・凍結バルブ



Principle prototype



**Pre-engineering
prototype**

Molten Salt Loops & Key Equipments

Pump



Chemical Pump



Prototype Nuclear-Grade Pump

- Parameters
- Temp : 550~700°C
 - Flow : 300m³/h
 - Lift : ~ 20m
 - Rot Speed : 1480r/min

Valve



Principle prototype

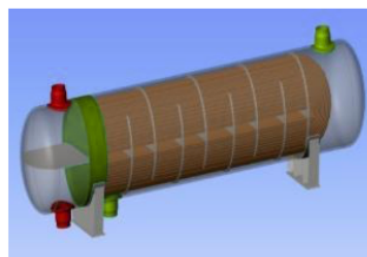


Pre-engineering prototype

Heat Exchanger



Salt – Air HX

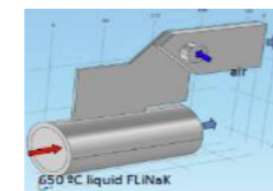


Salt – Salt HX

Instrumentation



Pressure gauge



HT ultrasonic flowmeter

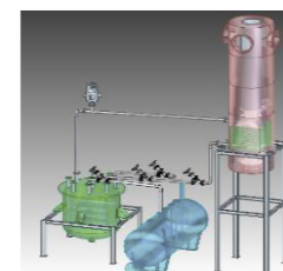
Loop



Nitrate test loop



FLiNaK test loop

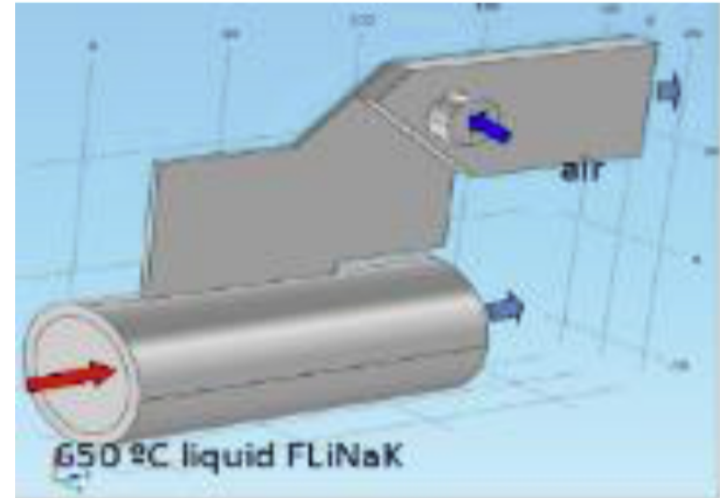


Natural circulation test loop

高温熔融塩の計測系(圧力、流速)



Pressure gauge



**HT ultrasonic
flowmeter**

中国のあるべき姿

（北京核能研究所・所長との対話）

1994年10月

- 明の時代、産業革命／蒸気機関の発明が西の辺境（大西洋に面した島）で起きたことをどう捉えるか。（先を越されたことを恥とまでは思わないまでも・・・）
- 近世（明代末期～）に中国がたどってきた歴史を考えると、外に遅れをとってはいけない。
- 数学や論理を基軸に据えないと、失敗を繰り返す。（倫理学の偏重／文系主導への反省）
- ビジョンをもって、理系の人材を登用し、最大限のちからを発揮する。

新しいアプローチ

50年のブランクを5年で取り戻すには

考えられる戦略

4年後～5年

実機スケール
モックアップ
ハードウェア

スケールファクタ
問題を解決する

- 熱伝達、熱膨張
- 流体機械振動
- 拡散、物質輸送

0年～5年

テーブルトップ
モックアップ
ハードウェア

盆栽／箱庭コンセプト
お盆の上に庭を作り
塩saltの振舞いと対話
迅速な試行・部品取替
作業コストの適正化
計算機モデルと連携

1年～5年

デジタル・ツイン
計算機上のモックアップ
計算機モデル

(米国DARPAの概念)
CADデータから、
計算機上に実機を組み立てて稼働。
物理化学モデル組込。

← 21世紀の最新技術による飛翔 →
アドホック・専門家／職人チームによる集中的活動

提言

- 過酷な事故を、実機（モックアップ）で起こしてみせる規模から、再出発する。
- 電気加熱、「モックアップ（模型）」で、一般の人々の目前で、実際に事故を起こしてみせる
- 電気加熱だから放射能の心配がない（飛び散らず）ので最大限度、思い切ったことができる
- 市場を狙う、小型炉（SMR）、であれば現実にこの再出発のやり方が、デモンストレーションとして可能。安全性にかかるコストも明らかになる。
- 熔融塩炉なら、これができる。