

# 熔融塩炉開発の世界の動向 と日本の歩み

山脇 道夫

東京大学名誉教授

福井大学附属国際原子力工学研究所参与

(一社) 次世代エネルギー研究開発機構(BERD)理事長

日本原子力産業協会-原子力システム研究懇話会運営委員長

# 熔融塩炉 (MSR)とは？

- 核燃料に熔融塩を用いる原子炉。（食塩NaClを数百度C以上に加熱すると液体状態になるが、そのような液体状態の塩を熔融塩と言う。）  
冷却材にも熔融塩を用いることが多い。
- 燃料塩；フッ化物塩 (LiF-BeF<sub>2</sub>-AF<sub>3</sub>, LiF-NaF-KF-AF<sub>3</sub> etc.)、  
塩化物塩 (NaCl-KCl-ACl<sub>3</sub>, NaCl-MgCl<sub>2</sub>-ACl<sub>3</sub> etc.)  
ただし、A; Actinide 即ち U, Pu, Th, MA
- 冷却材塩；フッ化物塩 (LiF-BeF<sub>2</sub>, LiF-NaF-KF etc.)、  
塩化物塩 (NaCl-KCl, NaCl-MgCl<sub>2</sub> etc.)

# 熔融塩炉の特徴

- 沸点が高く作動圧力が低い
- 透明である (ActinideやFPが含まれると濁る)
- 負のフィードバックが大  
(ボイド係数、温度係数ともに)
- Cs、Iなど揮発性FPの蒸気圧が低く環境への放出少
- 事故時には燃料塩を退避可能  
(安定収束可)  
 安全炉として優れている
- アクチニド溶解度大 (塩化物で>50%)  
 TRU(即ち、Pu + MA)燃焼炉として優れている

Th-U増殖

様々な組成

U-Pu 燃料

# 溶融塩冷却

## 溶融塩燃料

中性子減速

高速中性子

ループ型

MSRE/MSBR(ORNL)

FUJI (Furukawa)

ThorCon (USA)

MA 燃焼

EURATOM/Russia

タンク型

RinR (TTS)

MOSART (MARS)

統合型

(HEX in Vessel)

MOLTEX, UK

IMSR(LeBlanc, Canada)

UNOMI (Kamei)

IMSFR, Japan

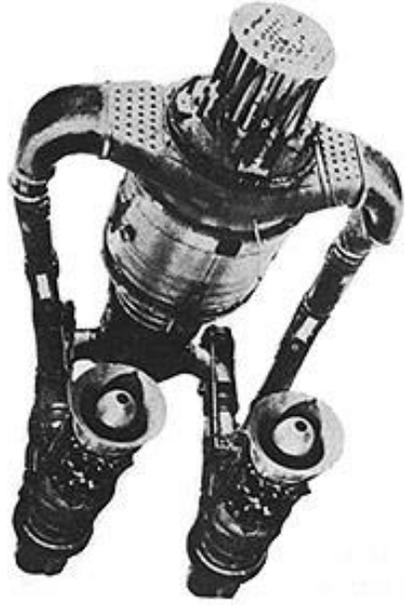
MSFR (EVOL)

## 固体燃料

フッ化物塩冷却高温炉 (FHR)

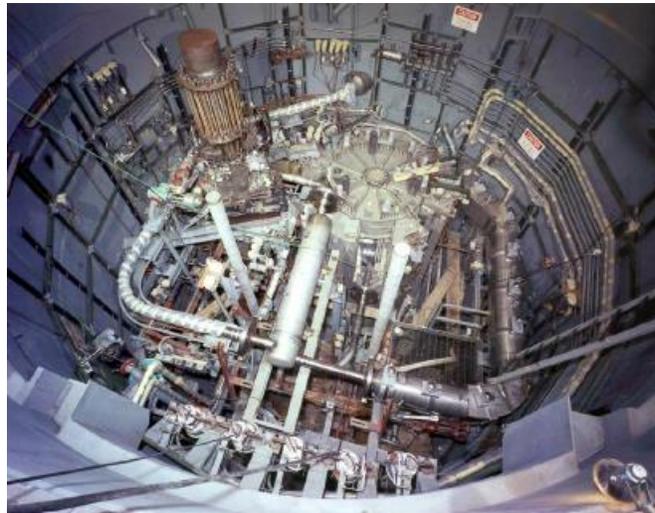
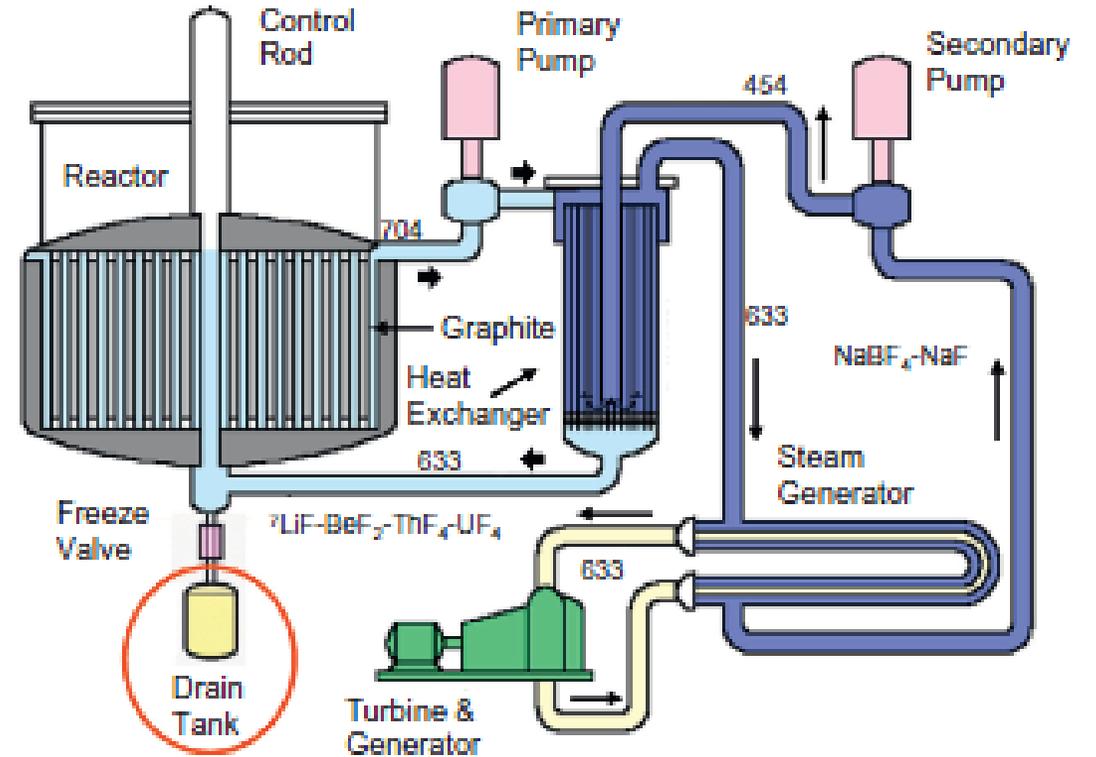
SINAP(Shanghai, China) NEUP,IRP(US/DOE)

# 歴史的溶融塩熱中性子炉(米国ORNL)



1950年代  
ORNLの航空用エンジン：  
Aircraft  
Reactor  
Experiment  
(ARE)

## フッ化物燃料



1960年代  
ORNLの溶融  
塩実験炉：  
Molten Salt  
Reactor  
Experiment  
(MSRE)

1970年代ORNLのMSBR (設計のみ)

# 米国の溶融塩炉開発：ORNLからTerraPower

## ➤ 溶融塩実験炉（MSRE）

開発者：オークリッジ研究所（ORNL）

溶融塩：フッ化物

時期：1964～1969年に運転成功

（以降、溶融塩増殖炉の開発が進められたが、1976年の米国政策変更等により中止）

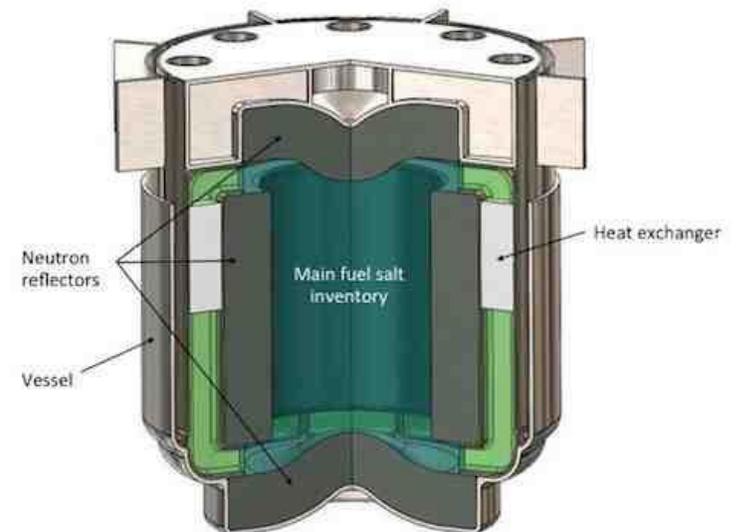


## ➤ 溶融塩高速炉（MCFR）

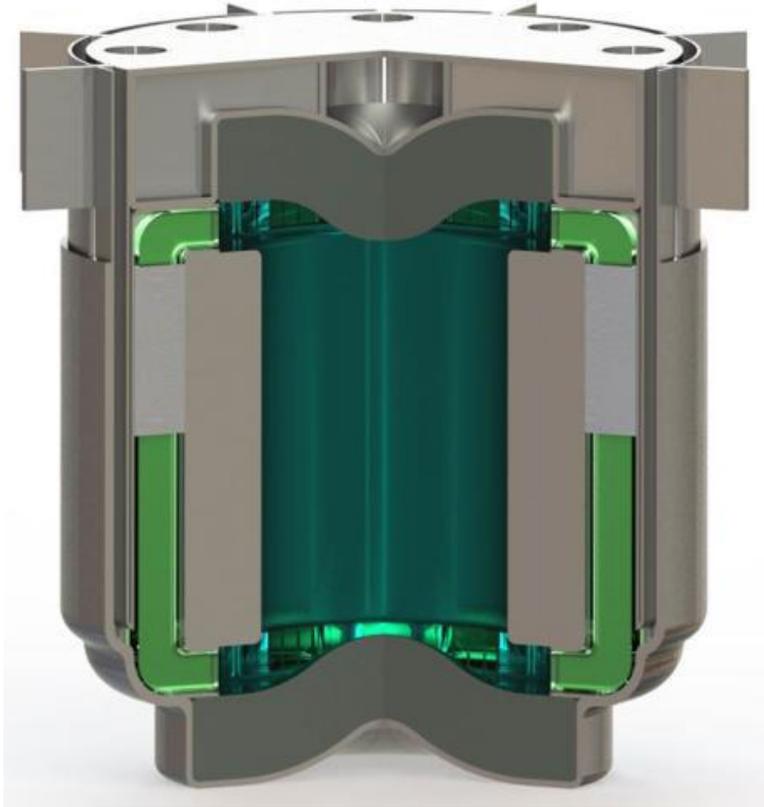
開発者：TerraPower, ORNL, EPRI  
Southern Company

溶融塩：塩化物

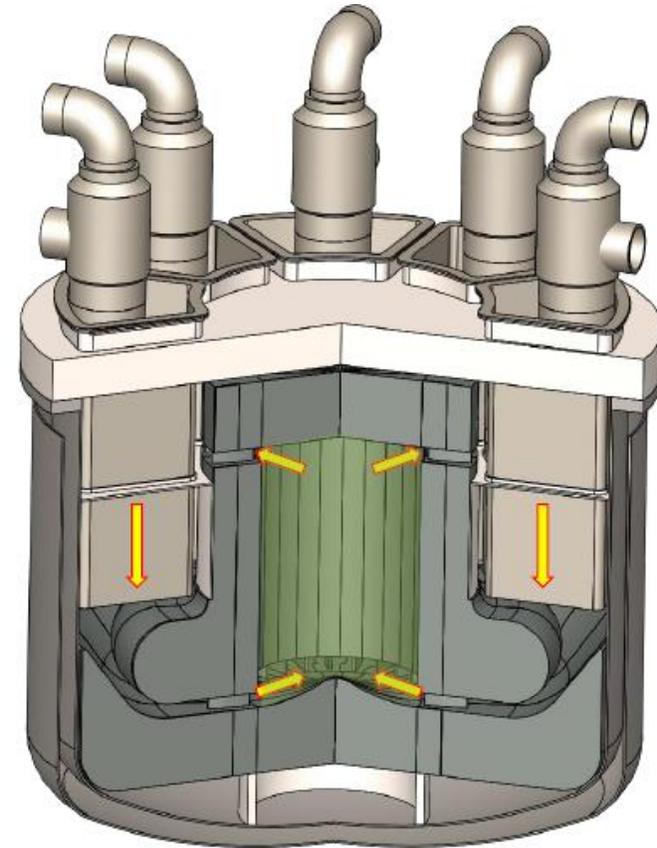
時期：2016年設計（詳細未公開）



# TerraPowerの熔融塩高速炉

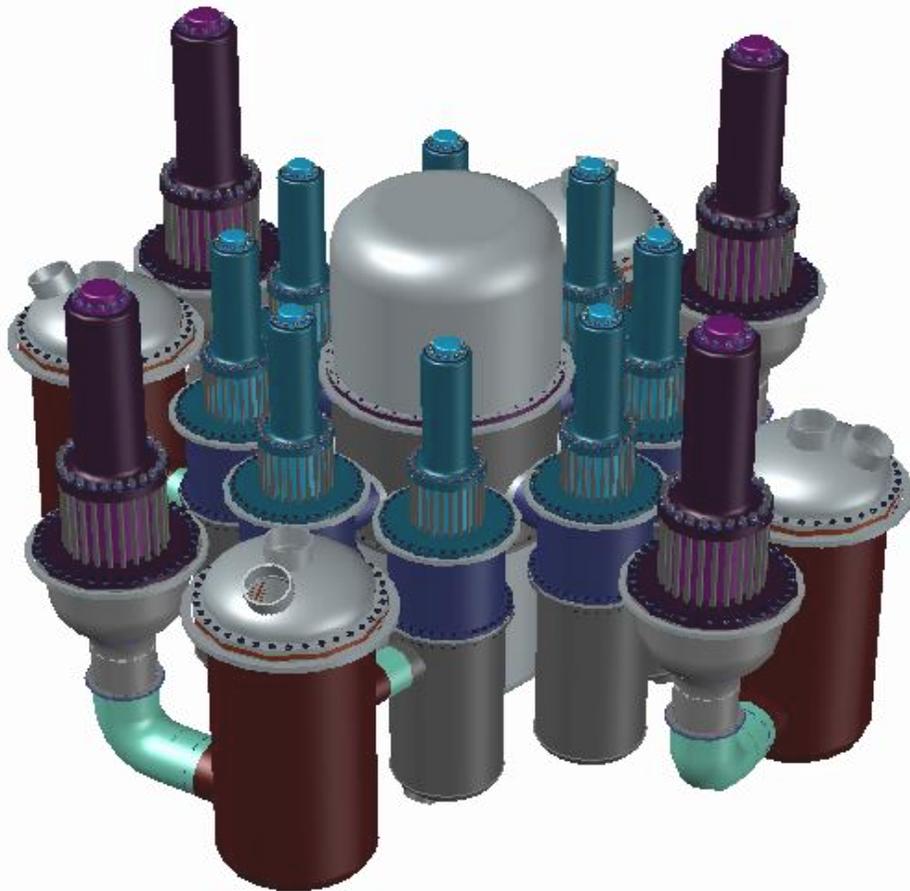


2016年  
TerraPower  
塩化物燃料



2017年8月  
TerraPower  
塩化物燃料

# Elysiumの溶融塩高速炉



2018年Elysium提案

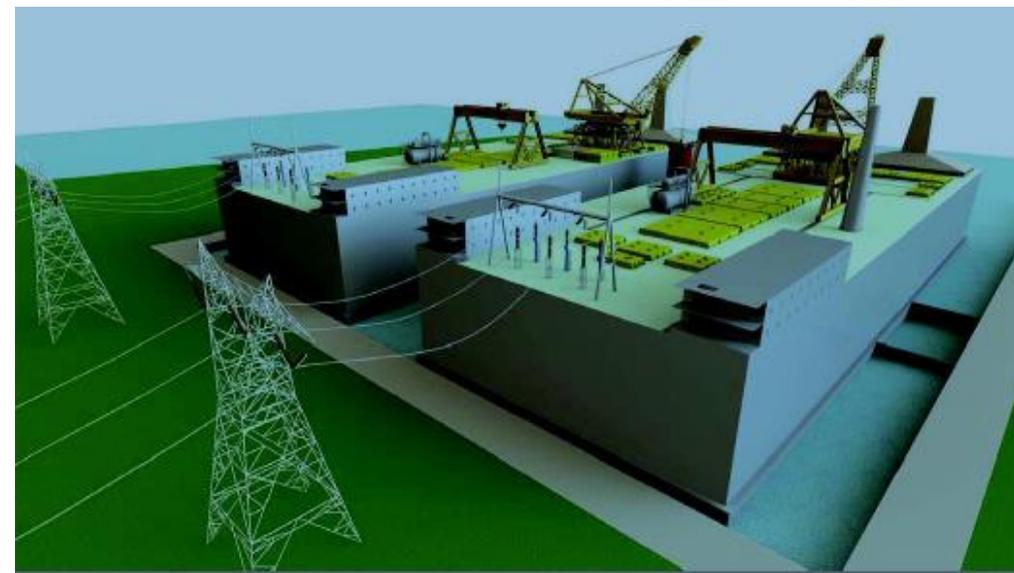
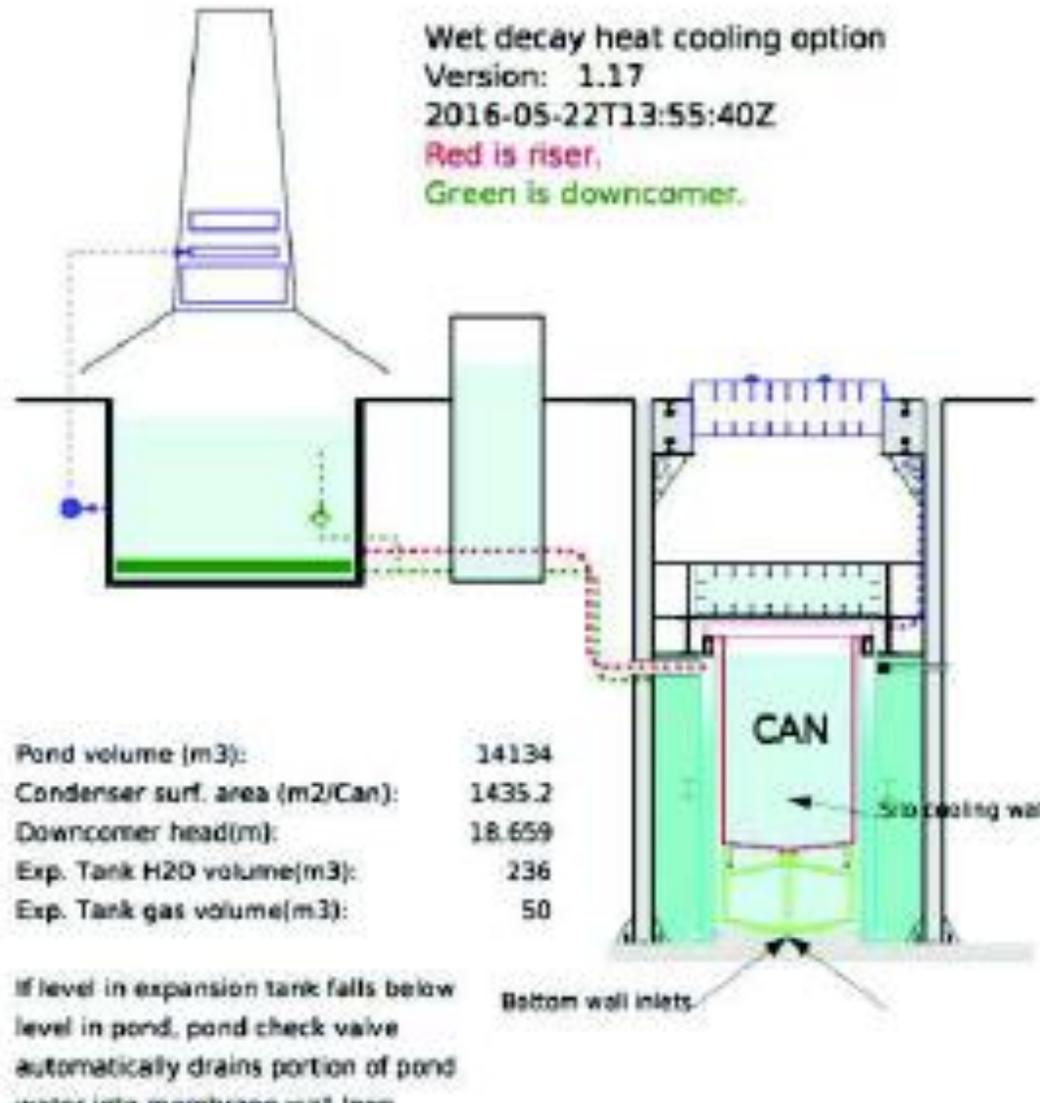
Name	Molten Chloride Salt Fast Reactor (MCSFR)
Fuel	Liquid - <b>SNF, RGPu, WGPu, DU, LEU, Unat, DU, Th</b>
Salt Form	<b>Chloride based Fuel Salt</b>
Thermal Capacity	10* - 4000 MWth (Flexible)
Electrical Capacity	25 - 2000 MWe (Flexible)
Core Outlet Temperature	610 - 750 - 1000 C
Core Inlet Temperature	510 - 550 - 600 C
Delta Temperature	100 - 200 - 400 C

# ThorConの溶融塩熱中性子炉

## フッ化物燃料

## インドネシアに導入される見込み (ハーグリーブス社長の弁)

ThorConの船に  
乗せた溶融塩炉



# アメリカの状況①

- ORNLでMSREを1960年代に実施：FLiBe系
- 2007年以降FHR (Fluoride salt cooled High-temperature Reactor) (ペブルベッド燃料 + 熔融塩冷却材) を中国とも共同で研究
- 2015年以降DOEがGAINプロジェクト (産業界、大学、研究機関に対する原子力革新技術の研究支援) として\$48Mの予算を投入。
- Southern Company, TerraPower, EPRI, TransatomicPower-ORNL, Elysium Industries-INL-ANL, Terrestrial Energy-ANL, Kairos Power-ANL-INL, Muons Inc, Urbix Resources, ThorConなどの企業、団体が開発推進。

# アメリカの状況②

## DOE推進プロジェクト(2016-2018)

- Terrestrial Energy / ANL : 高温での熔融塩の性質の評価
- TransatomicPower / ORNL : 燃焼計算とサイクルの最適化
- Elysium Industries / INL / ANL : 塩化物熔融塩燃料の開発
- Kairos Power / ANL / INL : FHRにおける熱流動解析
- Muons Inc / ORNL : 軽水炉燃料のフッ化物塩燃料への転換
- Terrestrial Energy USA / ANL : 燃料塩の熱伝導、粘性評価
- TransatomicPower / ANL : 燃料塩の物性評価
- Terrestrial Energy USA / ORNL : 炉心温度・出力計測手法
- UrbixResources / ORNL : 黒鉛粉末交換手法
- ThorCon/ ANL : 熔融塩燃料の電気化学センサー開発

# MSRまとめ(アメリカ)

様式	名称	燃料/塩/減速材	開発者	出力(MWth)
固体燃料	AHTR/SmAHT R	LEU(TRISO)/FLi Be/Gra.	ORNL	3400/125
	PB-FHR	〃	Kairos	240
液体燃料 (熱炉)	Tr-MSR	LEU-LiF/ZrHx	Transatomic Power	1250
	iMSR	LEU-F/Gra.	Terrestrial Energy	400
	Thorcon-R	LEU,Th- FNaBe/Gra.	Thorcon International	557
	LFTR	Th-FLiBe/Gra.	Flibe Energy	600
	GEM*STAR	Ac-FLiBe/Gra.	Muons Inc	500
	Process Heat Reactor	U-FNaBe	Thorenco	40
液体燃料 (高速/熱外炉)	MCSFR	U/TRU-NaCl	Elysium Industry	10-4000
	MSFR	U-Cl	TerraPower	2500
	SCIFR	TRU/Th-NaCl	Flibe Energy	600
	SAFR	FNaBe固定/Hg coolant	Schattke Advanced Nucl. Eng.	50

# 中国での溶融塩炉開発

上海応用物理研究所（SINAP）を中心に多くの大学が研究を実施：

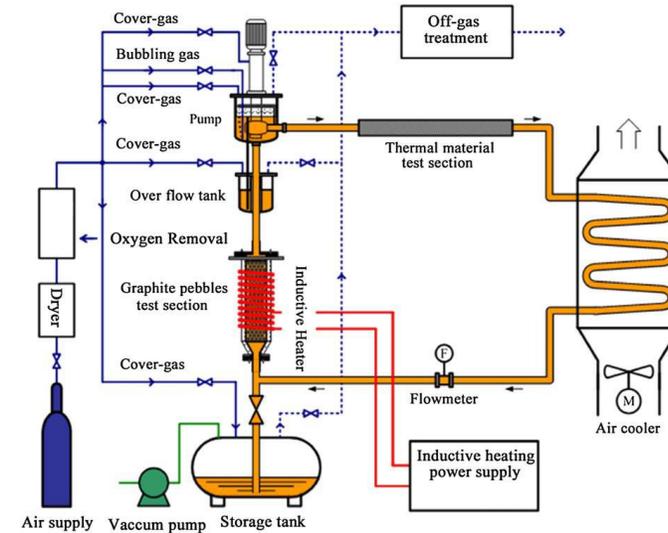
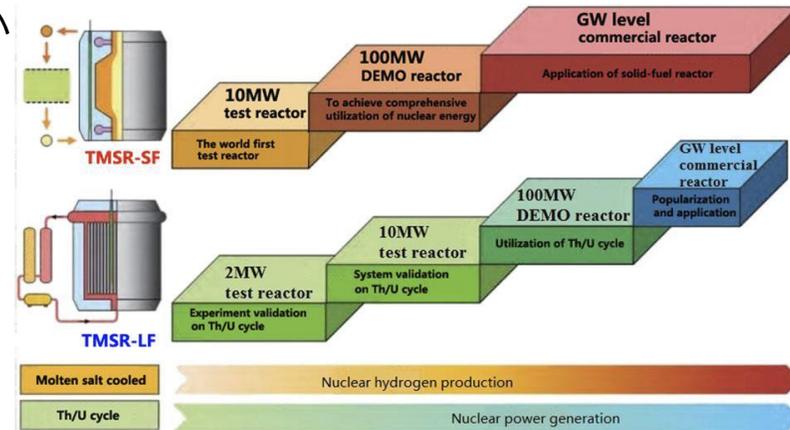
## ➤ Th溶融塩炉の開発計画

- ・ 固体燃料炉（TMSR-SF）から液体燃料炉（TMSR-LF）に進める開発計画。
- ・ 2025年までに、10MW固体燃料炉と2MW液体燃料炉の試験炉を建設。

## ➤ 溶融塩炉基礎研究の推進

- ・ 溶融塩（硝酸塩、フッ化物（FLINAK））ループによる自然循環・伝熱や材料データ取得。
- ・ 受動的崩壊熱除去系の設計・試験。
- ・ 固体燃料溶融塩炉は米国の安全規準構築（ANSI/ANS-20.1）に参画。
- ・ 今後の研究課題：材料、再処理、Th-U サイクル、熱流動、要素技術開発。

500～700人の若い研究者が参画！



# 中国の熔融塩燃料試験炉

2020年代初めに稼働予定

サイト：甘肅省武威(Wuwei)



<b>Power</b>	2MW
<b>Temperature</b>	630 °C / 650 °C
<b>Type</b>	Integrated design
<b>Fuels</b>	LiF-BeF <sub>2</sub> -UF <sub>4</sub> -ThF <sub>4</sub>
<b>Residual heat removal</b>	Passive air natural circulation system

# EUの状況

SAMOFAR (Safty Assesment of a MOlten salt FAst Reactor) 枠組で実施  
フランス(CNRS,IRSN,AREVA,CEA,EDF)、ドイツ(JRC,KIT)、オランダ(TU Delft)、イタリア(CIRTEN)、スイス(PSI)、メキシコ(CINCESTAV)

WP1:全体的安全評価 (事故の分類、シミュレーター等)

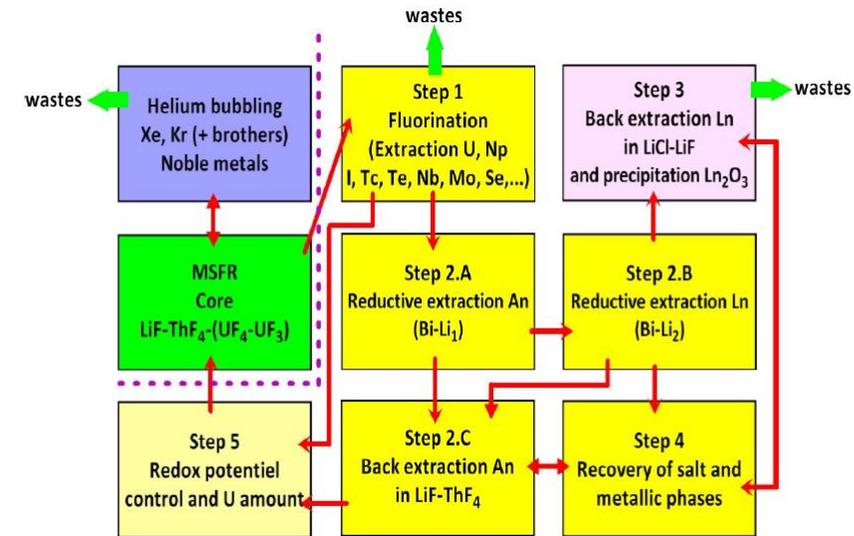
WP2:安全評価に関する燃料塩等  
の物性評価

WP3:熱流動等データの実験的取得

WP4:数値解析手法の開発  
(CFD、過渡解析、崩壊熱除去.)

WP5:塩の化学処理 (再処理等)

WP6:宣伝 (学生への教育等)

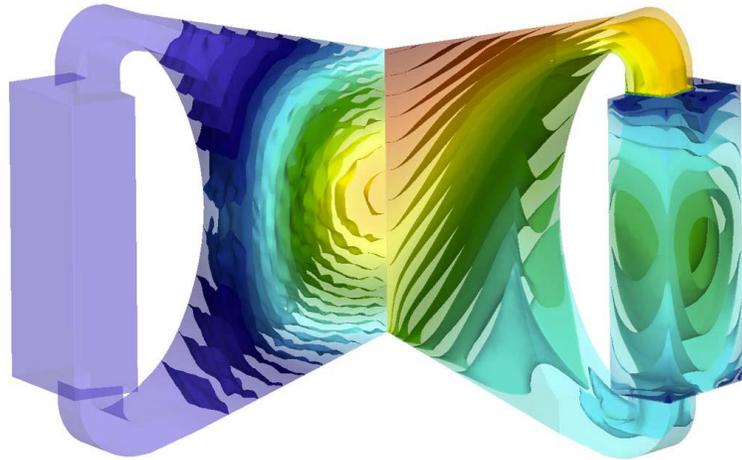


塩再処理スキーム

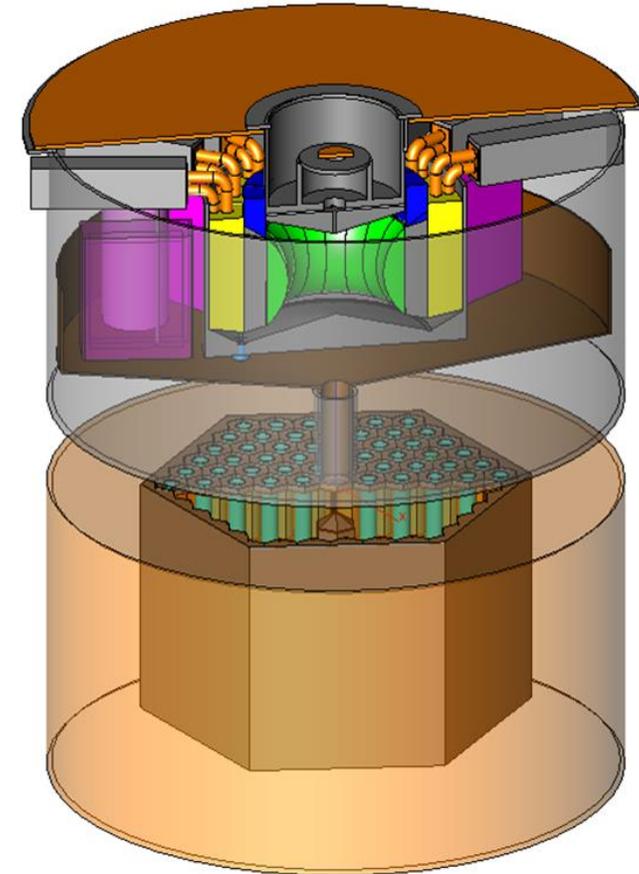
# フランスの状況

GIF/SAMOFAR-EVOL (Evaluation and Viability of Liquid Fuel Fast Reactor System) 等の枠組みで実施

- MSFR (フッ化物燃料溶融塩炉) における設計、安全評価、燃料塩化学・再処理、構造材、熱流動解析を実施



炉心核熱解析



炉断面図

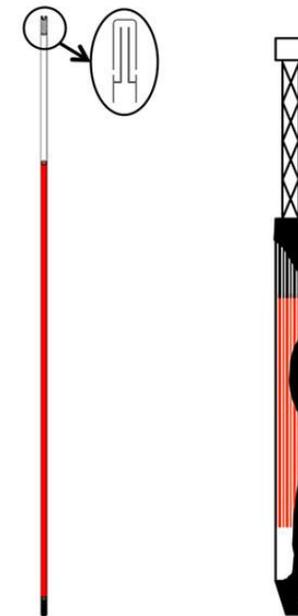
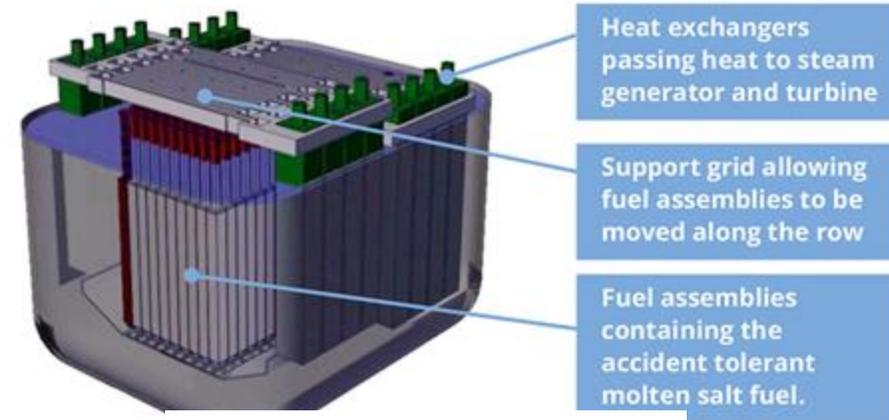
\* E.Merle, "Concept of Molten Salt Fast Reactor", MSR Workshop (2017.1)

# イギリスの状況; MOLTEX ENERGY社のSSR-W炉

・英国のventure企業MOLTEX Energy社は、ピン燃料型溶融塩炉SSR-Wを提案。  
PWR類似の燃料集合体で、被覆管には穴が開けられている。そのWaste burner型は、塩化物溶融塩燃料で高速炉。

・英国では2017年12月に開始された新型モジュール式原子炉（AMR）のコンペでMOLTEX社の原子炉を選定。

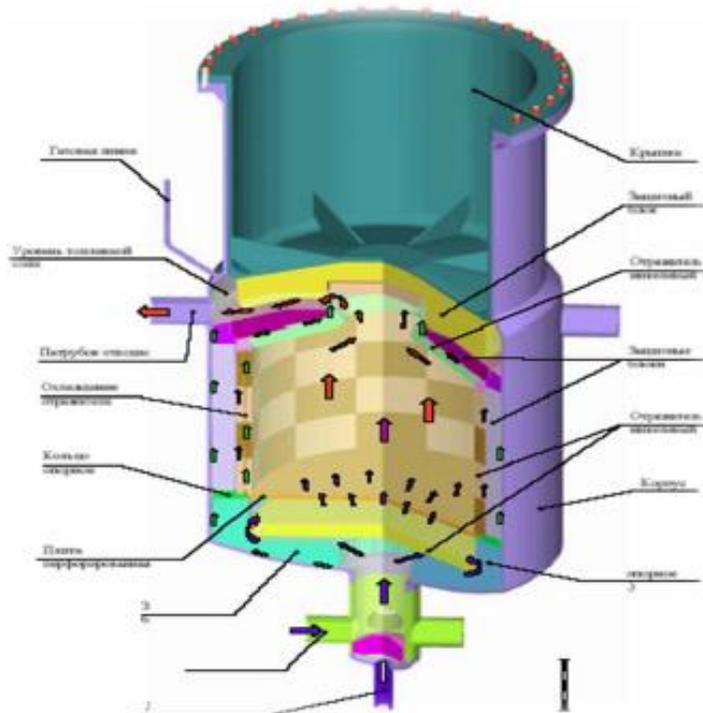
・カナダNB州は2018年7月にMOLTEXのSSR-Wを州内に建設することを目指すと発表。

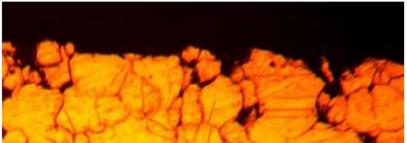
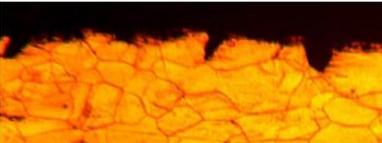
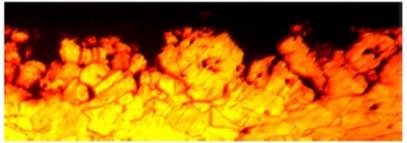
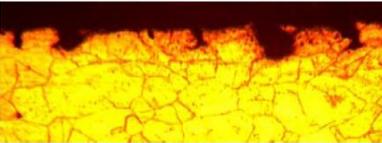
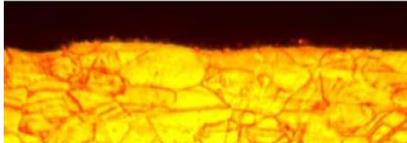
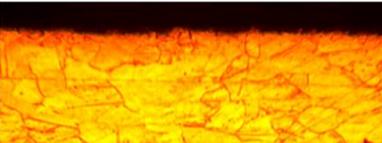


# ロシアの状況

Kurchatov Instituteで実施：MOSART (MOlten Salt Actinide Recycler and Transmuter)  
(欧州SAMOFARにも参画)

- ・ フッ化物燃料塩による核変換、トリウム増殖炉
- ・ サイクル、過渡解析、過酷事故評価、燃料塩物性、材料腐食など、計算、実験両面で積極的に取り組んでいる。



<i>Li, Be, Th, U/F</i>	<i>HN80MT-VI</i>	<i>HN80MTY</i>
<i>[U(IV)]/[U(III)]</i> 500 without loading at 735°C	<i>K = 3360pc×μm/cm; l = 166μm</i> 	<i>K = 1660pc×μm/cm; l = 68μm</i> 
<i>[U(IV)]/[U(III)]</i> 500 Loading 25MPa 750°C	<i>K = 8300pc×μm/cm; l = 180μm</i> 	<i>K = 1850pc×μm/cm; l = 80μm</i> 
<i>[U(IV)]/[U(III)]</i> 100 Loading 25MPa 750°C	<i>no</i> 	<i>no</i> 

材料腐食試験結果

# その他の国での最近の溶融塩炉開発

## ➤ 溶融塩炉・商業用初号機の立地検討（カナダ）

開発者：テレストリアル・エネジー社

内容：統合型溶融塩炉（IMSR）商業用初号機の2020年代建設を目指し、チョークリバー研究所敷地への設置に関わるフェージビリティ調査をカナダ原子力研究所と開始（2017年6月発表）。



## ➤ 溶融塩炉の耐食材料開発（オランダ）

開発者：オランダ原子力研究機構NRG、

内容：2017年8月に高中性子束原子炉でフッ化物混合溶融塩が入った容器の中性子照射試験を開始。



# まとめ

各国で、それぞれ特徴のあるMSR推進プロジェクトが稼働  
実用化に向けて

- 熔融塩の性質の理解（フッ化物、塩化物、Th、U、TRU）
- 炉心燃焼解析と熱流動解析（プラント設計）
- プラント制御手法の開発（運転技術）
- 燃料塩処理（サイクル・廃棄物処理）
- 材料の評価（腐食等）
- 機器開発（ポンプ、弁等）
- 規制・基準の策定

が進展しており、早ければ2020年代には新しい試験炉/実証  
炉が稼働することと期待されている。

# MSRまとめ(各国)

様式	名称	燃料/塩/減速材	開発者	出力(MWth)
固体燃料	TMSR-SF2	LEU(TRISO)/FLiBe/Gra.	SINAP(China)	400
	IHTR	Th,U-Pebble/Gra.	BARC(India)	600
液体燃料 (熱炉)	TMSR-LF2	Th,LEU-FLiBe/Gra.	SINAP(China)	400
	FUJI-U3	Th-FLiBe/Gra.	Japan	450
	AMBIDEXTER	Th-FLiBe	Ajou Univ.(Korea)	250
	CAWB	Th,SNF-LiF/D <sub>2</sub> O	Copenhagen Atomics(Denmark)	50
	CUBE-100	Fluorides	Seaborg Tech.(Denmark)	250
	SSR-U	Static LEU-F/ZrF,ThF	Moltex Energy(UK)	300-2500
液体燃料 (高速/熱 外炉)	MSFR	Th-LiF	EVOL,SAMOFER(EU)	3000
	FMSR	U-Pu,Am-FLiNaK	Russia	3200-1650
	MOSART	SNF,TRU-FLiNaBe	Russia	2400
	SSR-W	Static PuCl <sub>3</sub> /Fluoride	Moltex(UK)	750-2500
	IMSBR	Th-U-LiF	BARC(India)	1900

# 国内の状況

# 日本原子力学会「熔融塩技術の原子力への応用」 研究専門委員会の活動

- ・主査： 山脇道夫（東大名誉教授）
- ・期間： 2013～2017年
- ・約50名のメンバー： 学、産、官から
- ・世界と国内の調査、国際的協力（ANS20.1, インドネシア）
- ・熔融塩炉の再検討、  
開発の方向性を議論
- ・報告書作成中



# 国内のMSR研究活動

## 委員会、会合

- 日本原子力学会「**溶融塩技術の原子力への展開**」研究専門委員会（主査：山脇）
- トリウム溶融塩炉国際フォーラム（ITMSF）（木下、吉岡）

## 個別研究

- 有田および山脇（福井大）：MSからの**揮発性FP放出特性**
- 福元および山脇（福井大）：Hastelloy-N の溶融塩による腐食特性
- 寺井（東大）：原子力システムにおける**溶融塩化学の研究**
- 高木（東京都市大）：炉物理に基づく**シミュレーション研究**

## 関連研究(高速炉、核融合)

- 小山および魚住（電中研）：溶融塩化物を用いる**乾式処理**のR&D
- 相良（核融合研）：核融合のためのフッ化物**FLiNaK-ループ**

## 概念設計

- 山脇（福井大、東大）および有田（福井大）：新型MSR: Static Fuel MSR (**S-MSR**)
- 山脇（福井大、東大、BERD）、小山（電中研）、望月（東工大、BERD）：  
新型溶融塩高速炉：**統合型溶融塩高速炉**Integral MS Fast Reactor (**IMSFR**)
- 三田地（元豊橋科技大）：**核変換のためのPu/MA 処理シナリオ**
- 廣瀬（元日立）：MS燃料設計および**処理シナリオ**

## ベンチャー活動

- 木下（TTS）：“Reactor in Reactor” 概念

# 熔融塩からの揮発性FP放出

有田 裕二、山脇 道夫 (福井大学)

M.Taira, et al. (Univ. of Fukui), Global 2015, September, 2015 - Paris

- ・ 熔融塩炉からの事故時放射能放出を模擬体系の測定で評価
- ・ 検出された蒸気種；

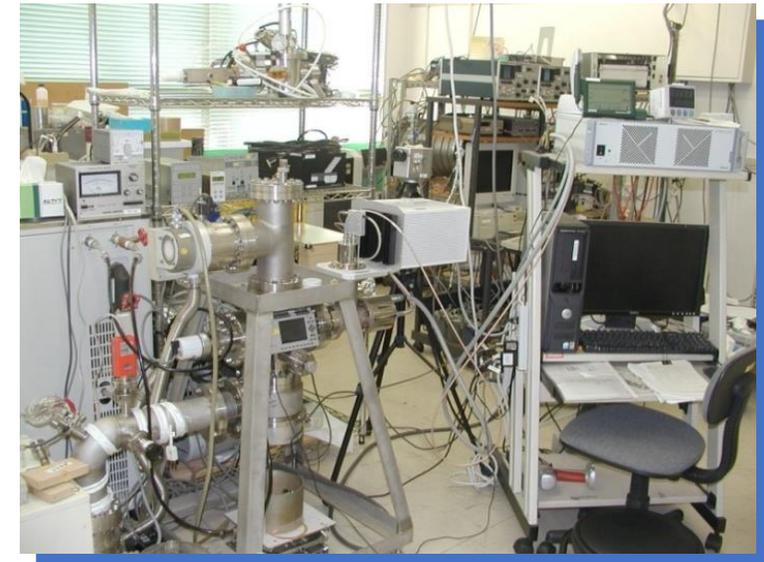
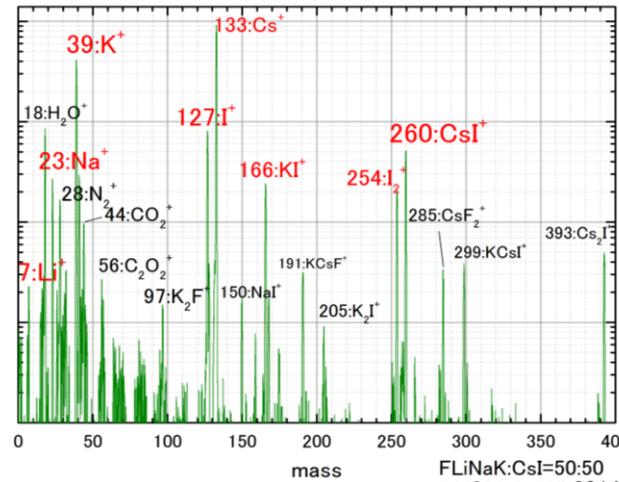
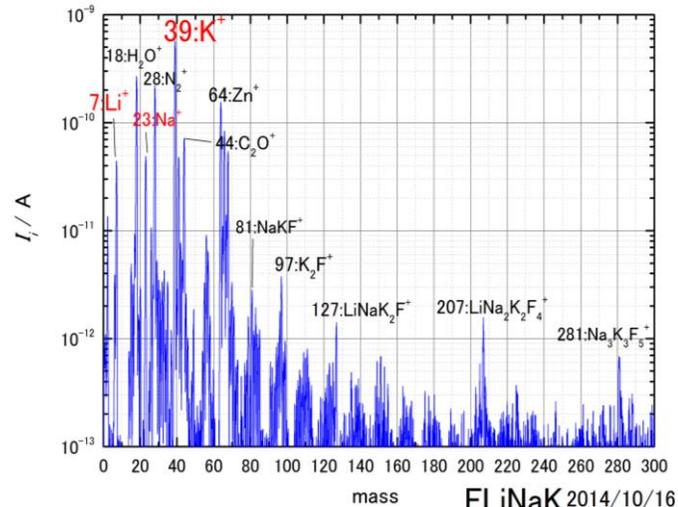
FLiNaK : KF, LiF, NaF

CsI 添加FLiNaK : KF, (KF)<sub>2</sub>, CsI, (CsI)<sub>2</sub>, KI

- ・ 軽水炉に比べ、過酷事故時の放射能放出量は  
1/100以下

- ・ さらに水素爆発フリー → 安全炉

質量分析計



# 熔融塩化学の研究

寺井隆幸 (東大)

仮想的事故の場合のFPの放出を調べるため、FLiNAKからのCsやIの蒸発量をトランスピレーション法により測定した。

1.0mol%CsI+3.3mol%CsF+ [LiF-NaF-KF]

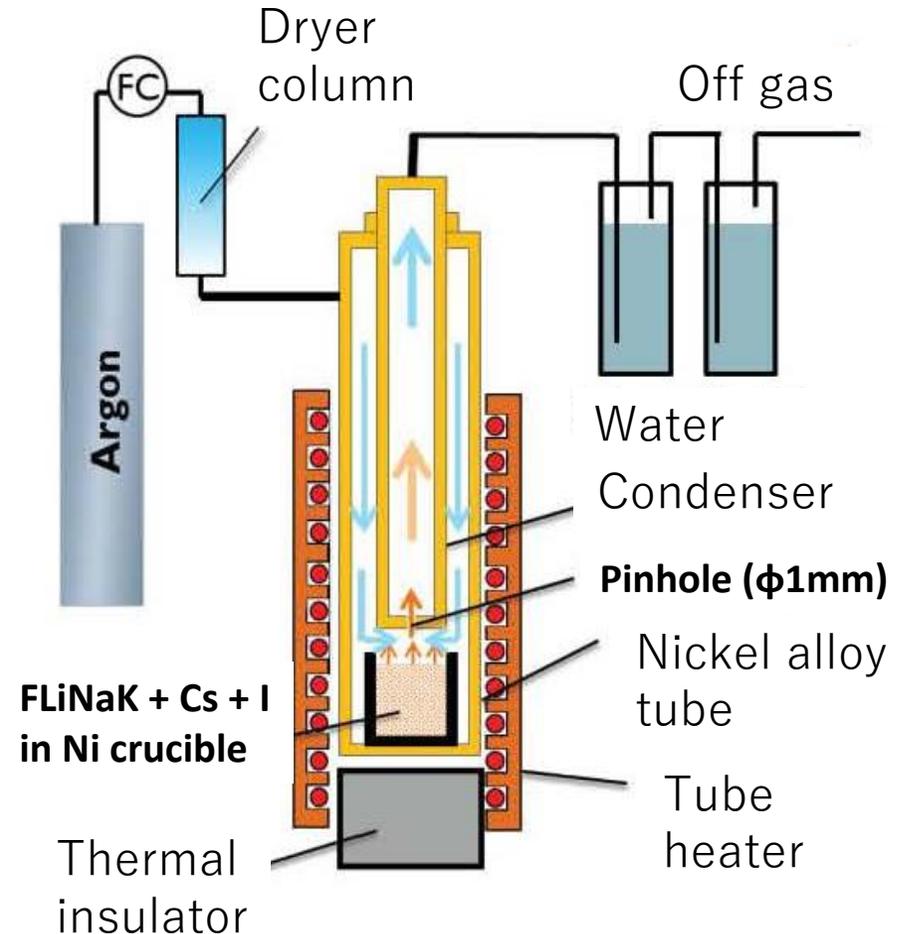
Y. Sekiguchi, et al.,

“Evaluation of Source Term for Severe Accident Analysis of Molten Salt Reactor –I, (6) Vapor pressure measurement of Cs and I in molten fluoride salt by transpiration method and evaluation by thermodynamics calculation” (in Japanese),

Transaction of AESJ-2015 at Hitachi/Japan

さらなる研究課題：

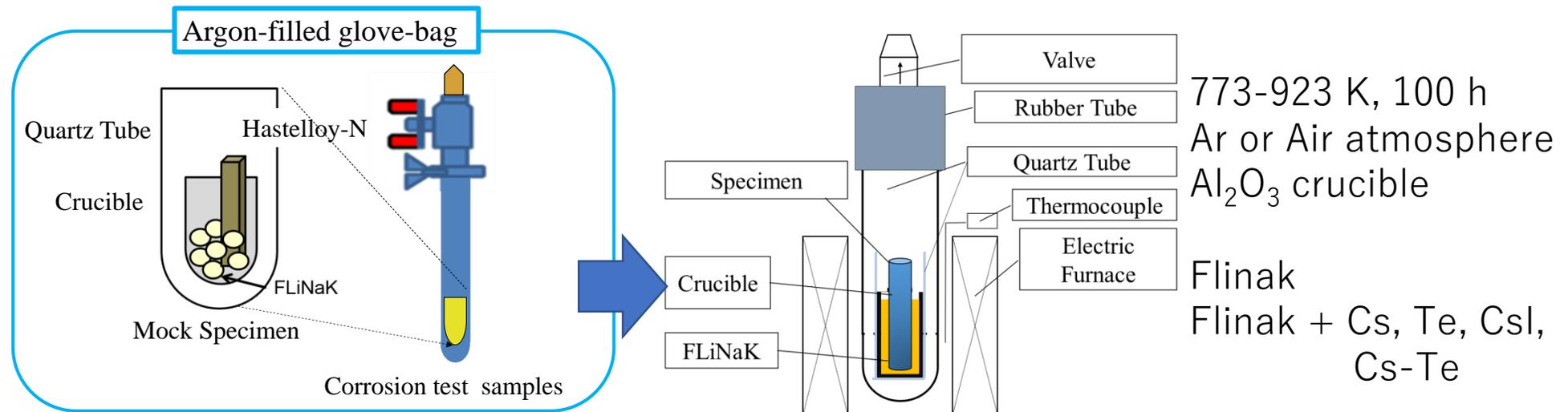
- FlibeのBe金属によるREDOX制御
- 構造材料のFlibeとの両立性
- 中性子照射下でのFlibe中トリチウム挙動



# Hastelloy-Nの熔融塩腐食

福元、山脇 (福井大)

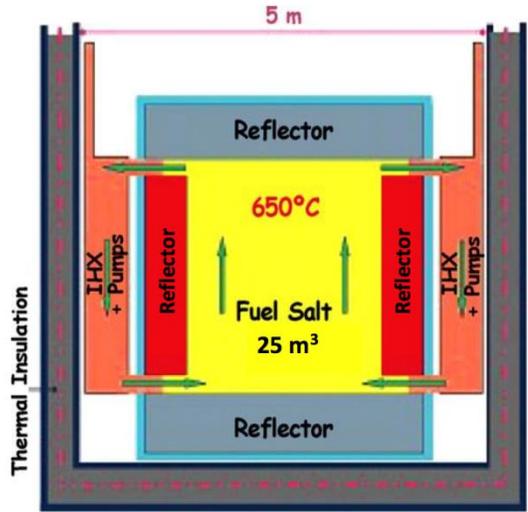
事故環境条件下での構造材料Hastelloy-Nの熔融塩 (FLiNaK) 腐食挙動を電顕観察により評価した。



- ◆ The depth of corrosive attack increased with temperature (depletion of Cr and Mo).
- ◆ Intergranular corrosion could be only seen at 773K, corrosive attack at 823K, 873K should be homogeneous corrosion type.
- ◆ There was no effect of Cs and Cs-I addition in molten salt for corrosion behavior.
- ◆ Te is an effective source for corrosion enhancement in molten salt to produce Ni-Te compound.
- ◆ There was no difference in the extent of corrosive attack on the surface of specimens under the influence of elevated temperatures between Ar and Air

# 熔融塩炉によるTRU(Pu/MA)核変換シナリオ

三田地紘史(元豊橋科技大)



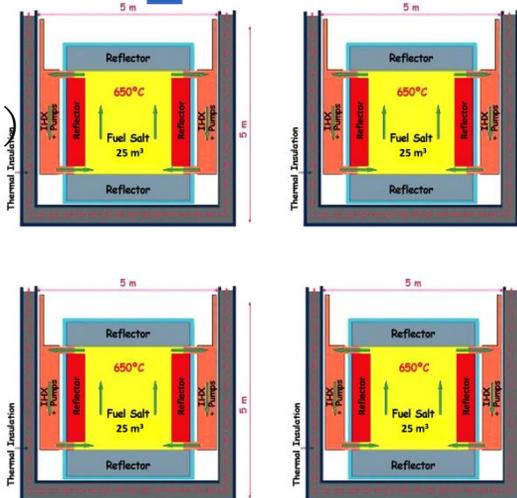
炉心径 ; 2.8m, 高さ ; 2.7m, 熔融塩容積 ; 25m<sup>3</sup> (炉心容積 ; 16m<sup>3</sup>)  
 燃料塩組成 ; LiF-NaF-KF (FLiNaK) + Pu/MA  
 Pu/MA は 25日毎に供給 (プラント利用率 ; 0.9)  
 再処理サイクル ; 2年, FPを抽出

FP は除去し、全 TRU はMSR炉心へ戻される

Pu/MAの同位体比は、  
 6年燃焼後の使用済み  
 燃料 (60GWd/t (PWR))

188 tons  
 TRU  
 を装荷

Mitachi, AESJ mtg.  
 (Kyoto, 2014)



各ユニット ; 2.5GWth,  
 4 ユニット 各 40年運転

残余 TRU

TRUは 炉心中に  
 20.9 ton 残留  
 TRU消滅率89%

除去FP中の  
 残余 TRU ;  
 0.103% →  
 400年管理期間

FPのみ  
 除去

2.5GWth

1 ユニット 40年運転

塩化物熔融塩化、連続再処理で効率UP

# TRUの高い核変換率(減量と毒性低減)が MSRで期待できる

- TRU装荷フッ化物MSRによる2段階照射(80年間)で、2年毎再処理なら188トンのTRUが20.9トンに減少する(89%削減)一方、1年毎再処理なら90%削減可能(三田地)



IMSFRなら、連続再処理に近い上、塩化物なので、90%以上の削減を見込める

- 酸化物燃料高速炉など固体燃料炉では、発熱などによるアクチニド装荷量の制約( $< 10\%$ )もあって、これほど高いTRU削減率は期待できない(塩化物で $> 50\%$ の装荷量)

# MSRの概念設計（国内）

# 熔融塩炉に何を期待するか？

- ゼロ炭素社会への移行のため、再生可能エネルギー導入とそのバックアップ電源、かつベースロード電源として原子力エネルギーを両立させることが喫緊の課題
- 原子力の最大欠点を改良する焦眉の目標：
  - 過酷事故フリーなシステムを構築
  - 高レベル廃棄物TRUの核変換処理(減容、短寿命化)
- 熔融塩炉はこれらの改良の担い手として期待できる
  - 原子力イノベーションの旗手

# 過酷事故フリーを目指す溶融塩炉(S-MSR)

## 山脇、有田(福井大)

- 静止燃料型溶融塩炉 (S-MSR)

M.Yamawaki & Y.Arita (Univ. of Fukui)

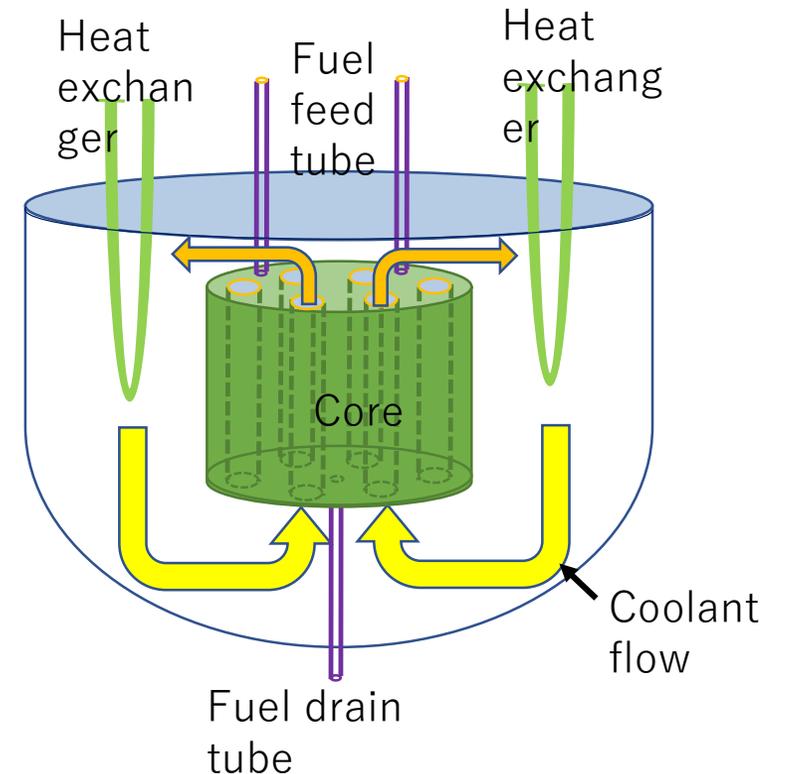
ICONE23, May, 2015

- 燃料塩は炉心内にとどまる

➡ 過酷事故フリーに限りなく近づく

- さらに、燃料再処理系との一体化で、  
安全性と機能性を向上

➡ 統合型溶融塩高速炉IMSFR (Integral Molten Salt Fast Reactor)

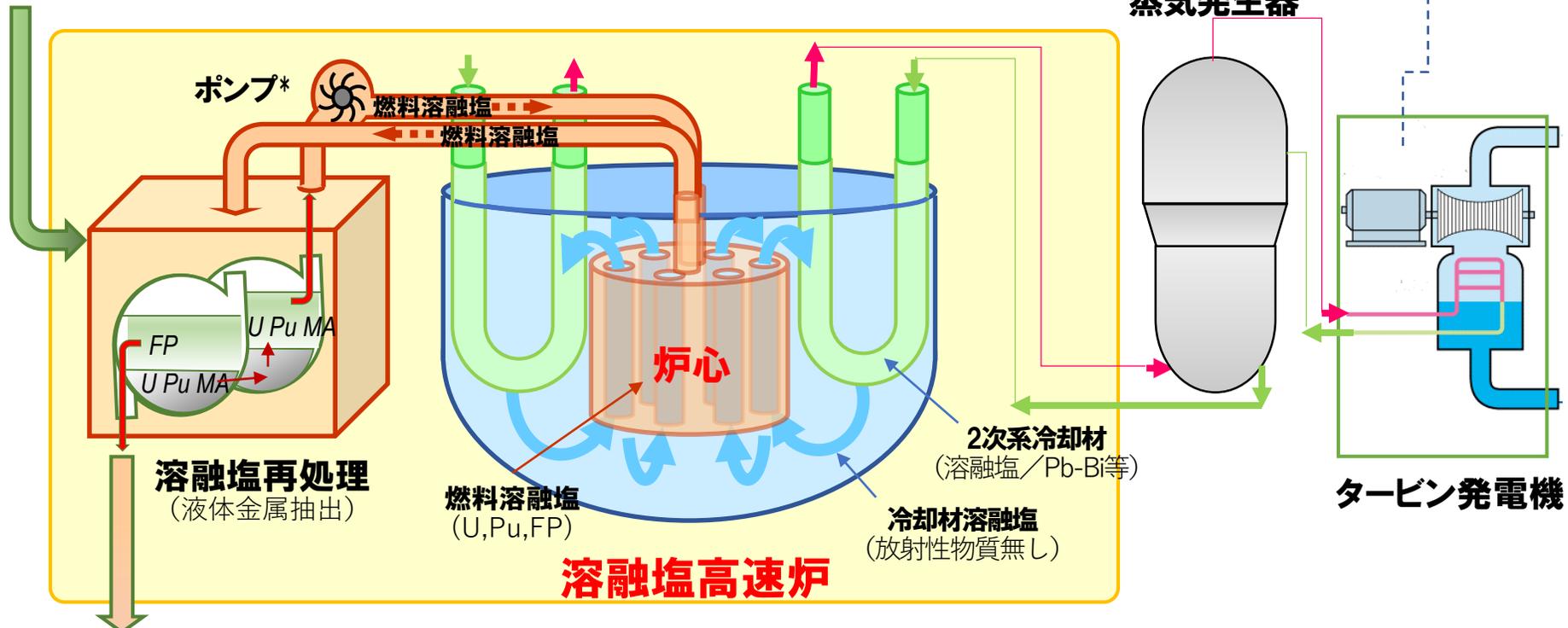


# IMSFR (Integral Molten Salt Fast Reactor) の概念

# IMSFR

山脇(福井大)、小山(電中研)

- ◆ SNFの六ヶ所再処理製品 (U,Pu)、劣化ウラン
- ◆ 使用済MOX、高レベル廃棄物、燃料デブリからのMAなど

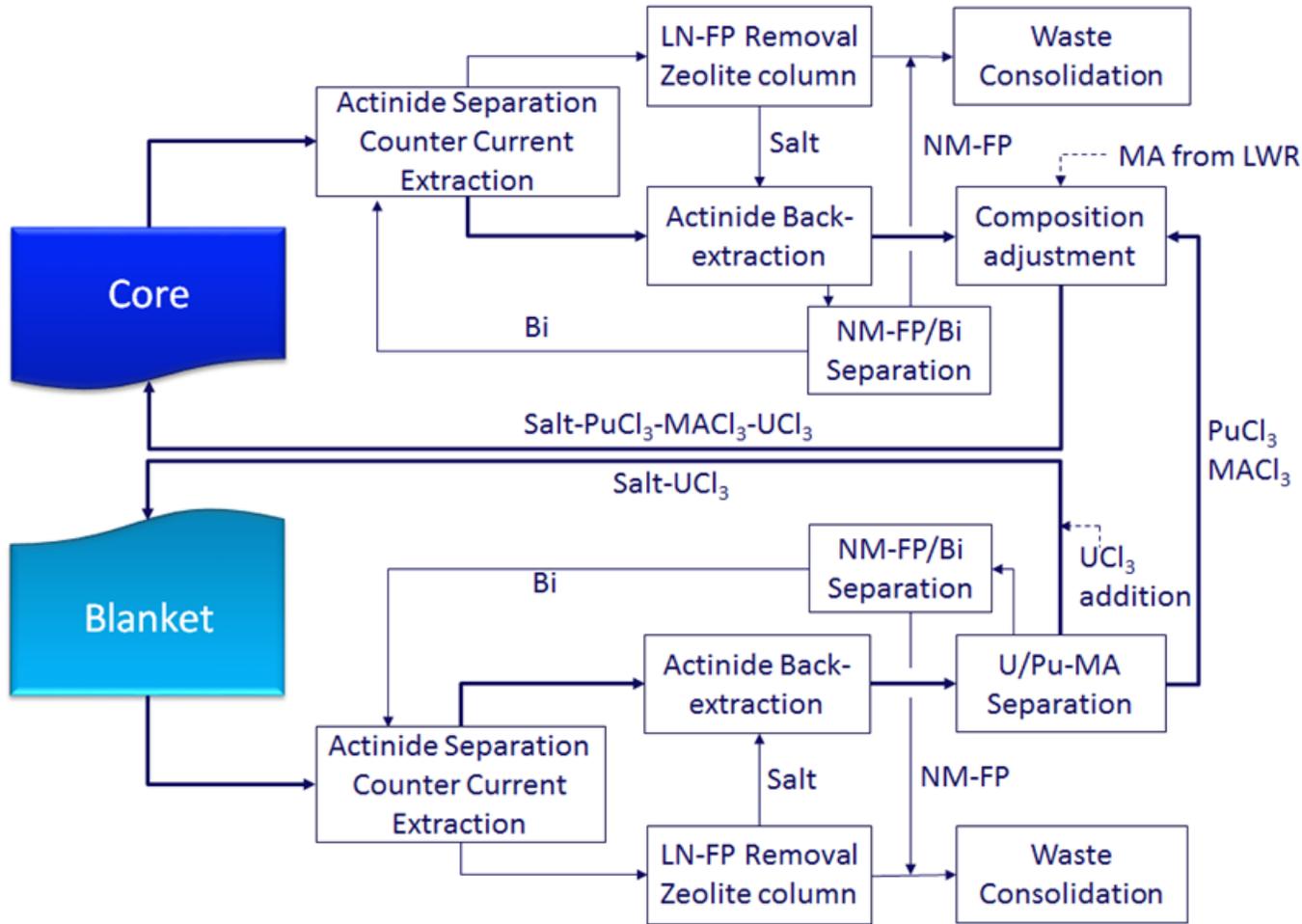


廃棄物 (FP) 400年 (超短期間管理期間)

\*) MAが十分燃焼したら (核変換が行われたら)、ポンプを稼働して燃料溶融塩を入れ替える。

# IMSFRの熔融塩処理系

## 山脇、小山



(J. Nucl. Radiochem. Sci., 16, 1-4, 2016)

液体金属(Bi,Gaなど)による  
液々抽出を利用

LN-FP : Less Noble FPs such as Cs, Sr, Ce, Nd  
 NM-FP : Noble Metal FPs such as Ru, Rh, Mo, Zr

# 塩化物とフッ化物の比較

- TRUの削減には高速炉が有利で、高速炉の溶融塩には塩化物のほうが減速能が低くて有利。
- 塩化物の方が融点が低く扱いやすい。
- 塩化物ではステンレス鋼を使えるのに対し、フッ化物ではNi基超合金が必要となる。（ステンレス鋼は工業材料として広く使用され、原研機構などでの経験も活用可能）
- 塩化物は高速炉乾式再処理で用いられるため、長年の経験の蓄積がある。（原研機構、電中研などの経験を活用可能）



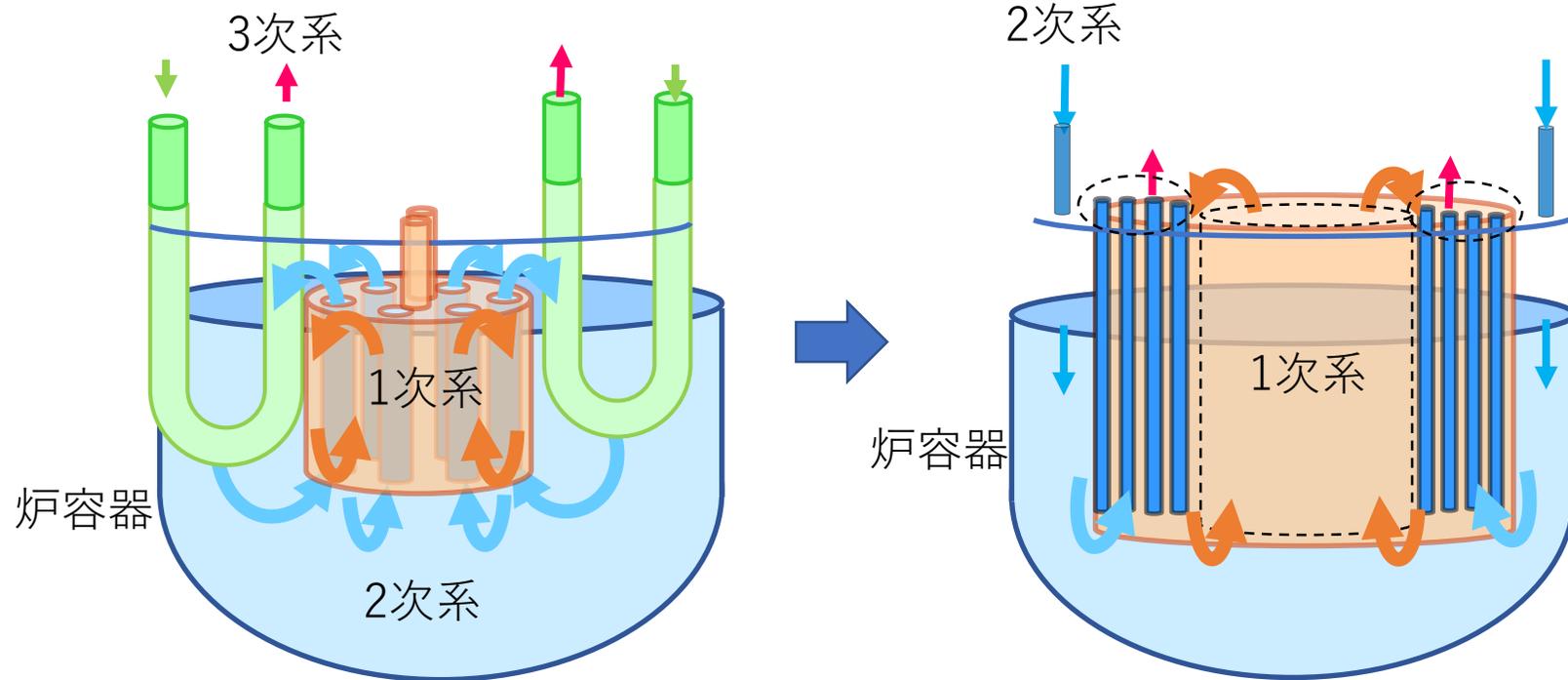
- IMSFRの溶融塩には塩化物が第一候補

# (一社)次世代エネルギー研究開発機構(BERD) (代表:山脇道夫) による設計活動

## IMSFR炉心概念の拡張:

### 問題点

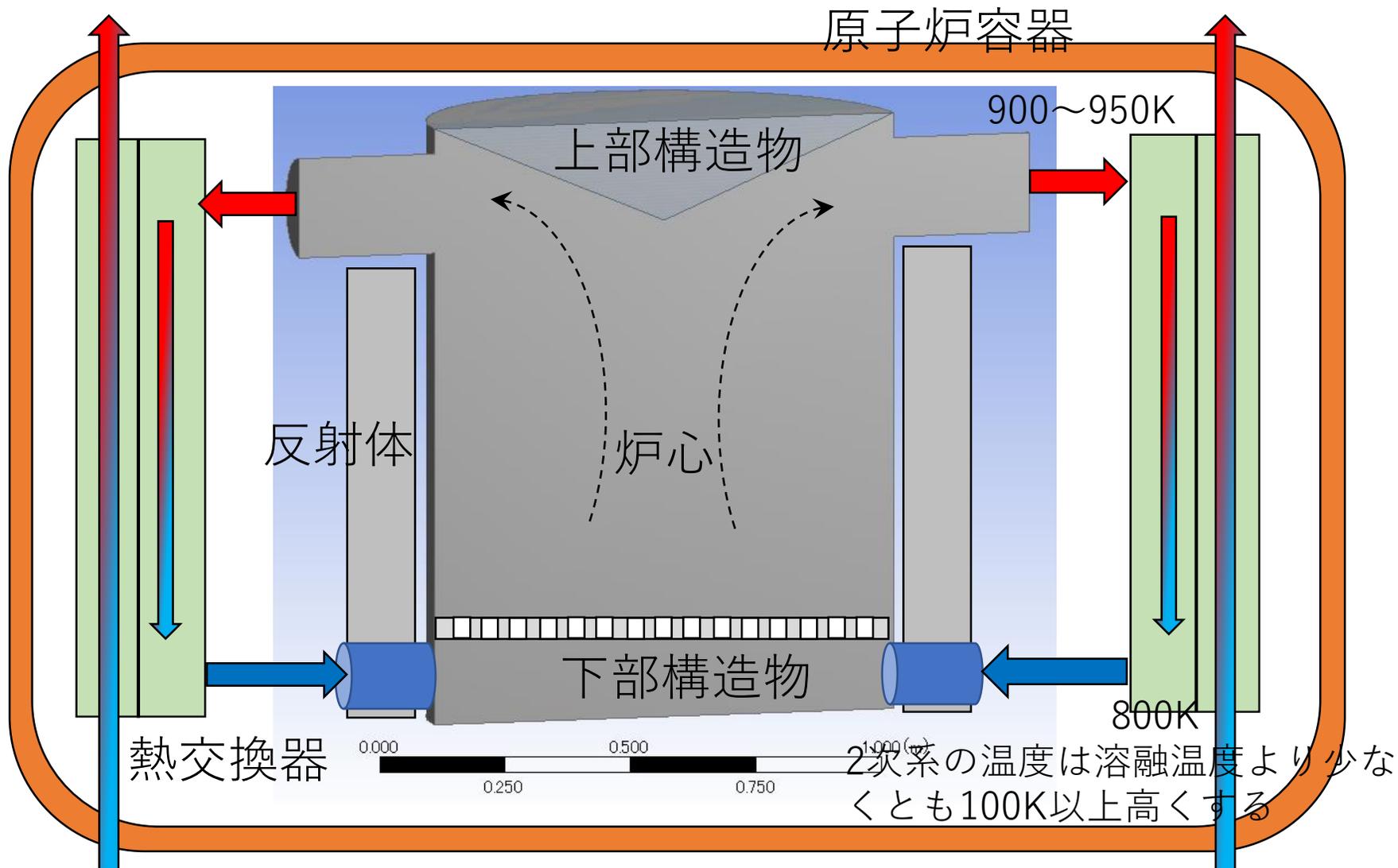
- ・ 冷却管の検査の難しさ: 冷却管破損時には炉心全体を取り換える必要がある
- ・ 冷却管の温度差による熱膨張
- ・ 3次系の入り口温度は融点より100K程度高くする必要 (水の場合4次系が必要)



### 改良点

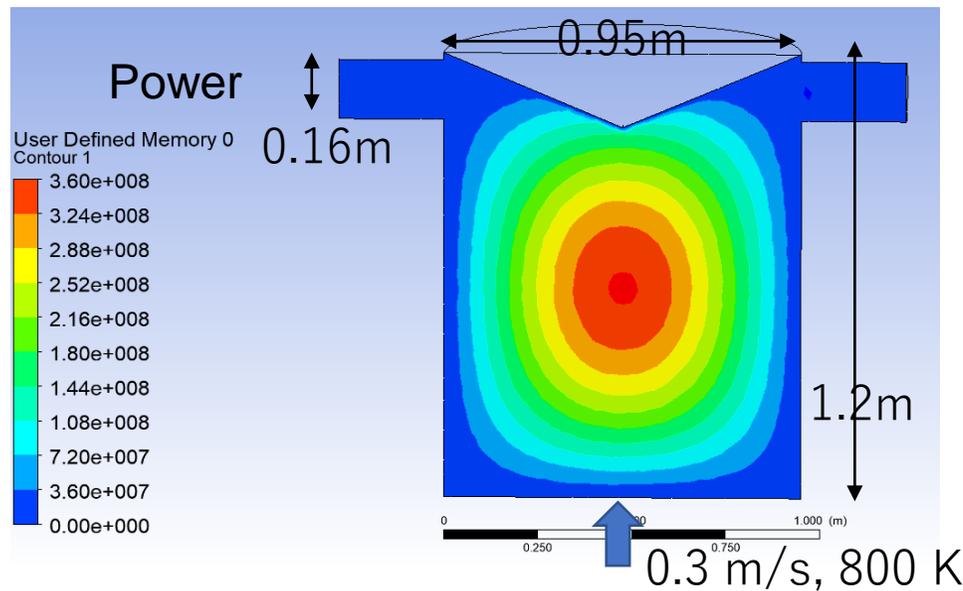
- ・ 燃料循環が循環する炉心部には、構造物を置かない
- ・ 熱交換は炉心部から周辺に移し中性子経済を向上させる
- ・ 熱交換部分は故障時の交換を考えて容器に入れる <sup>36</sup>

# 予測される炉心の形状



# IMSFR計算体系と出力分布(上部構造物有り)

## 望月(東工大、BERD)



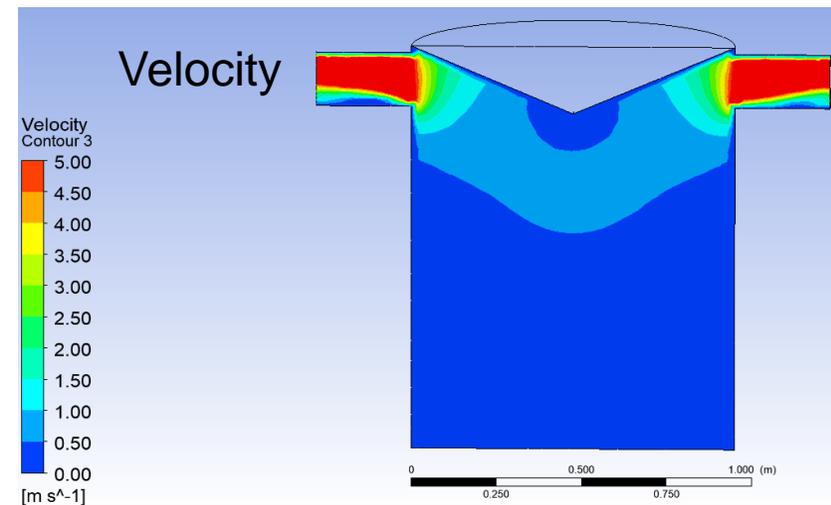
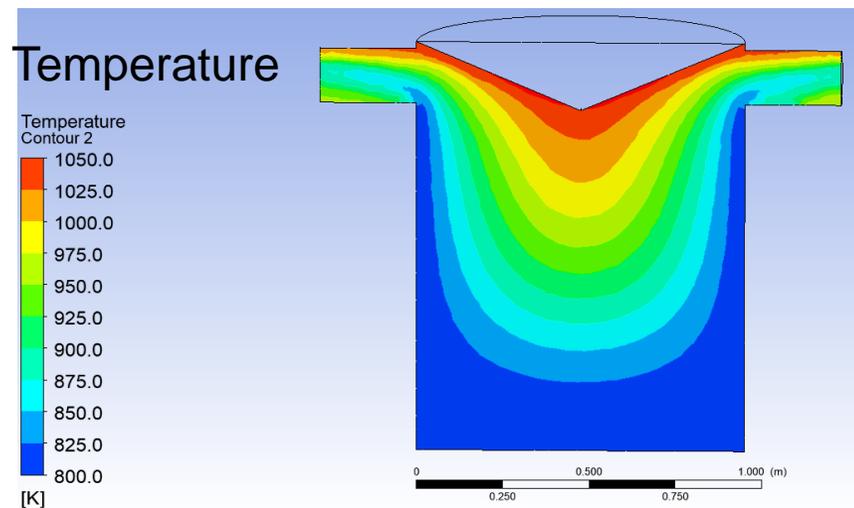
Volumetric heat rate

$$q''' = AJ_0 \left( \frac{2.405r}{R_0} \right) \sin \left( \frac{\pi z}{H_0} \right)$$

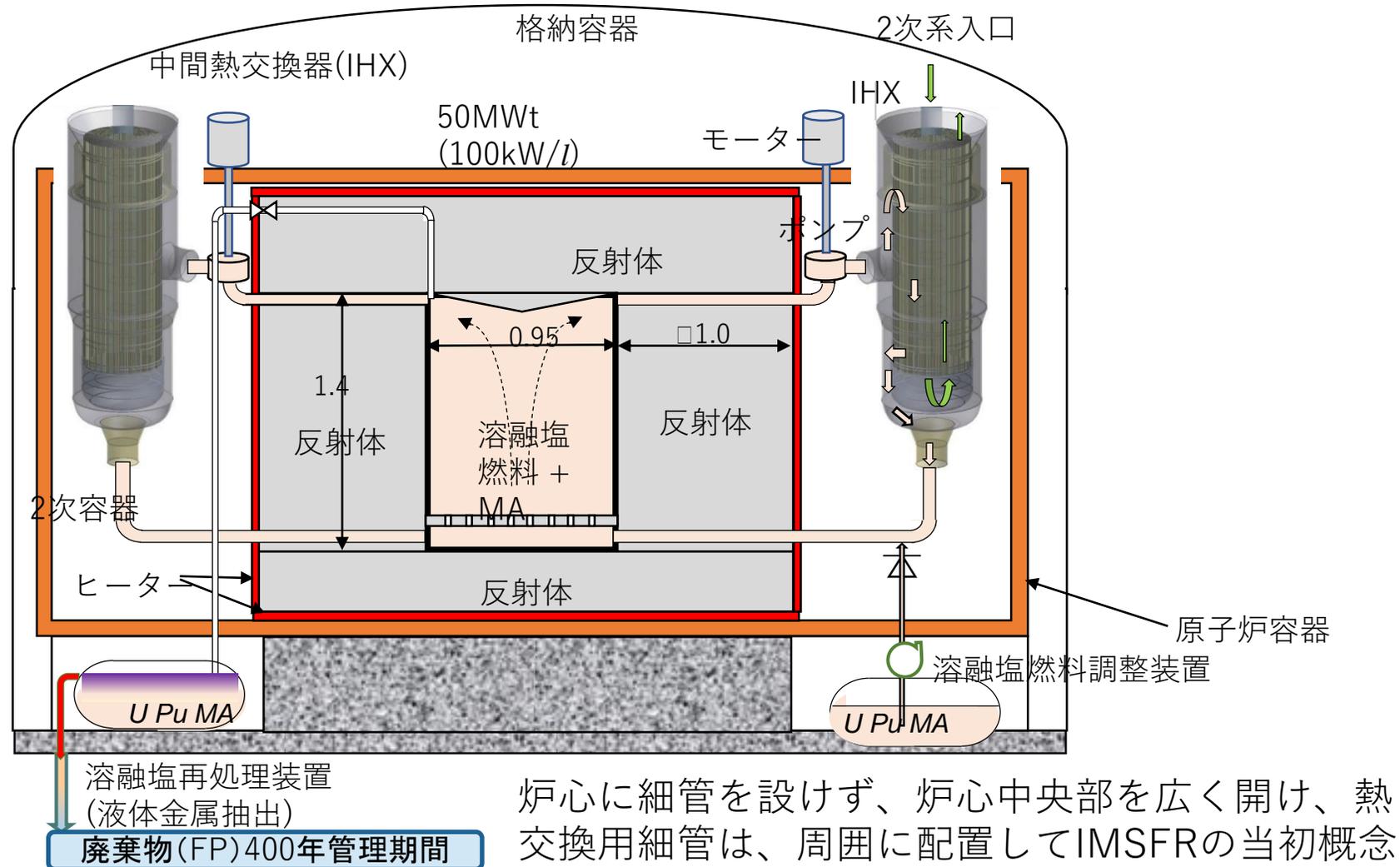
$$H_0 = 1.133 \text{ m}$$

$$A = 3.637 \times 10^8$$

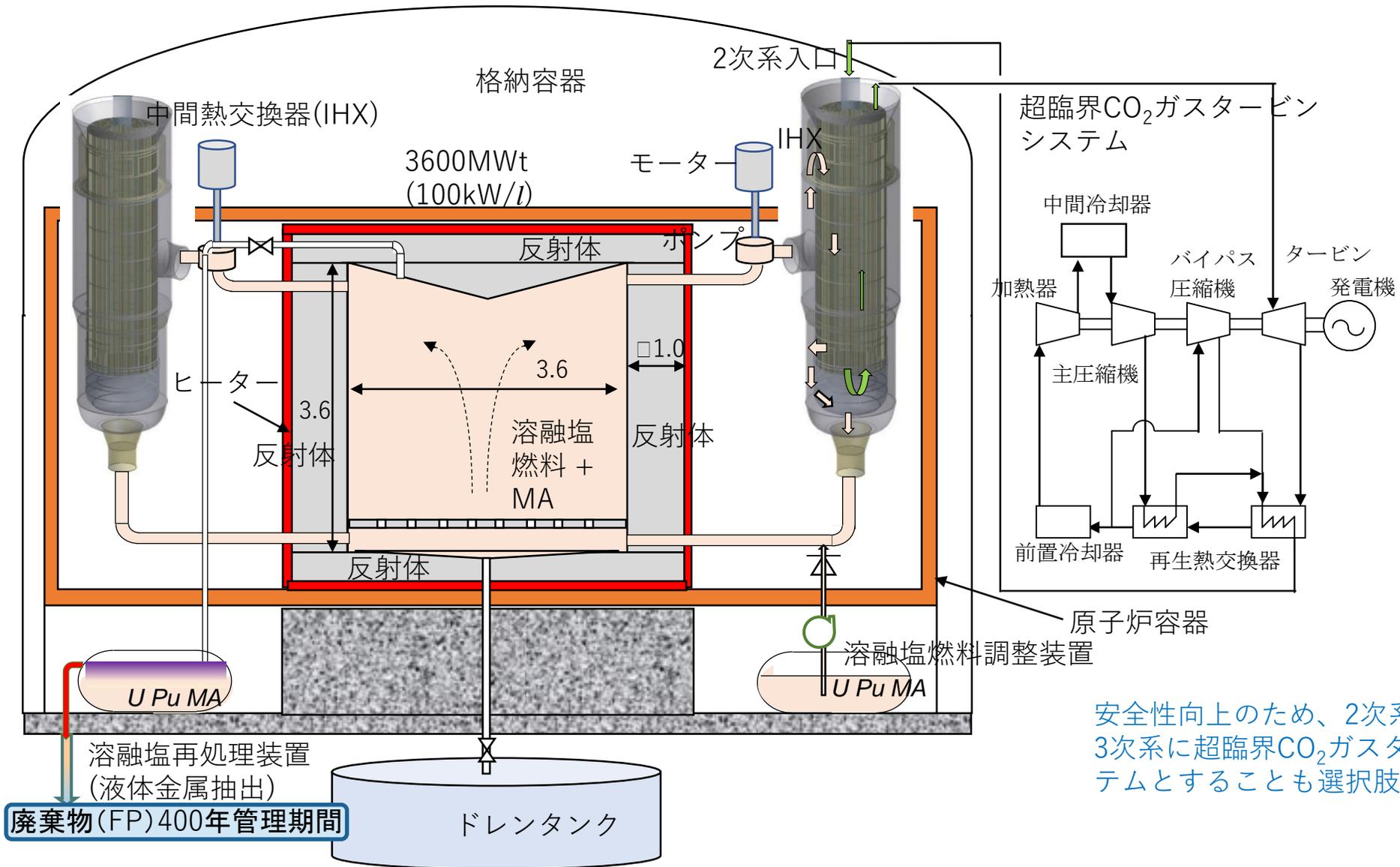
$$\text{Average power} : 100 \text{ kW/l}$$



# 円筒型熔融塩炉IMSFR50MW<sub>t</sub>実験炉



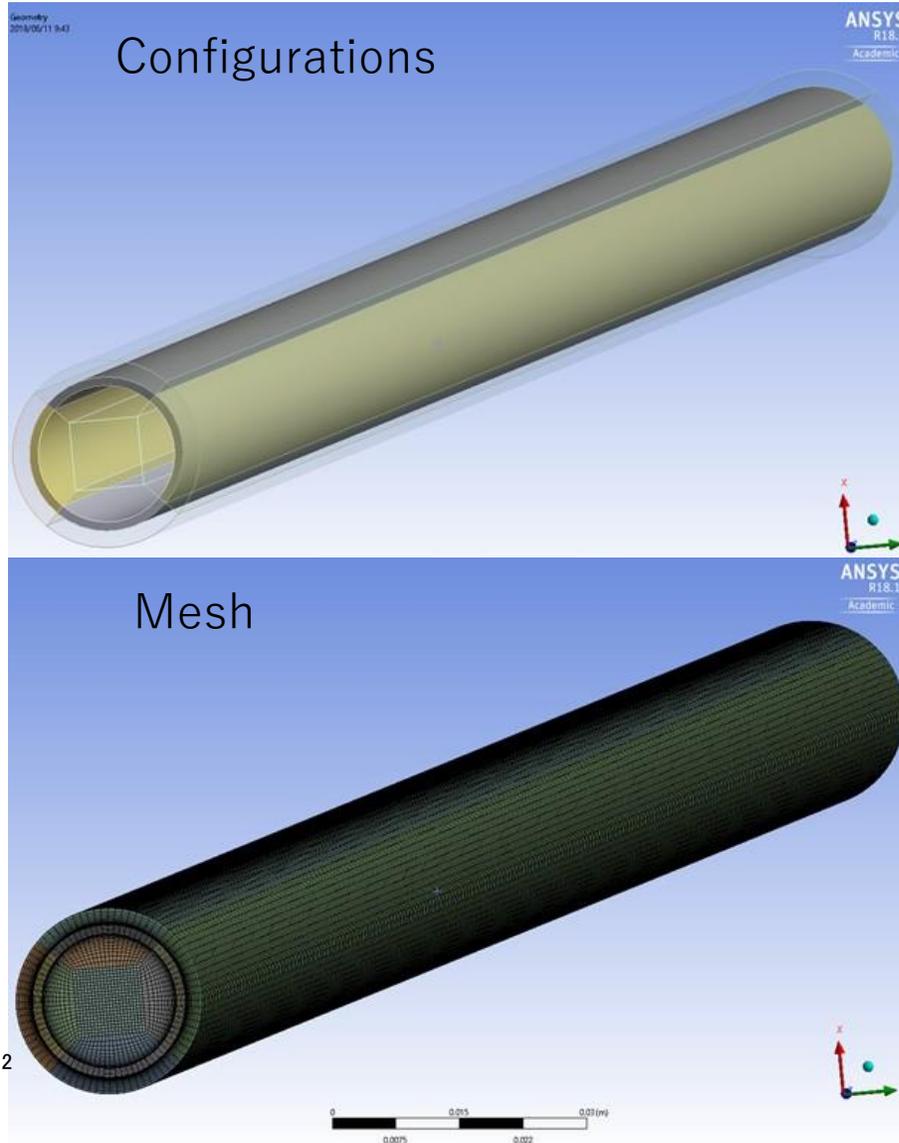
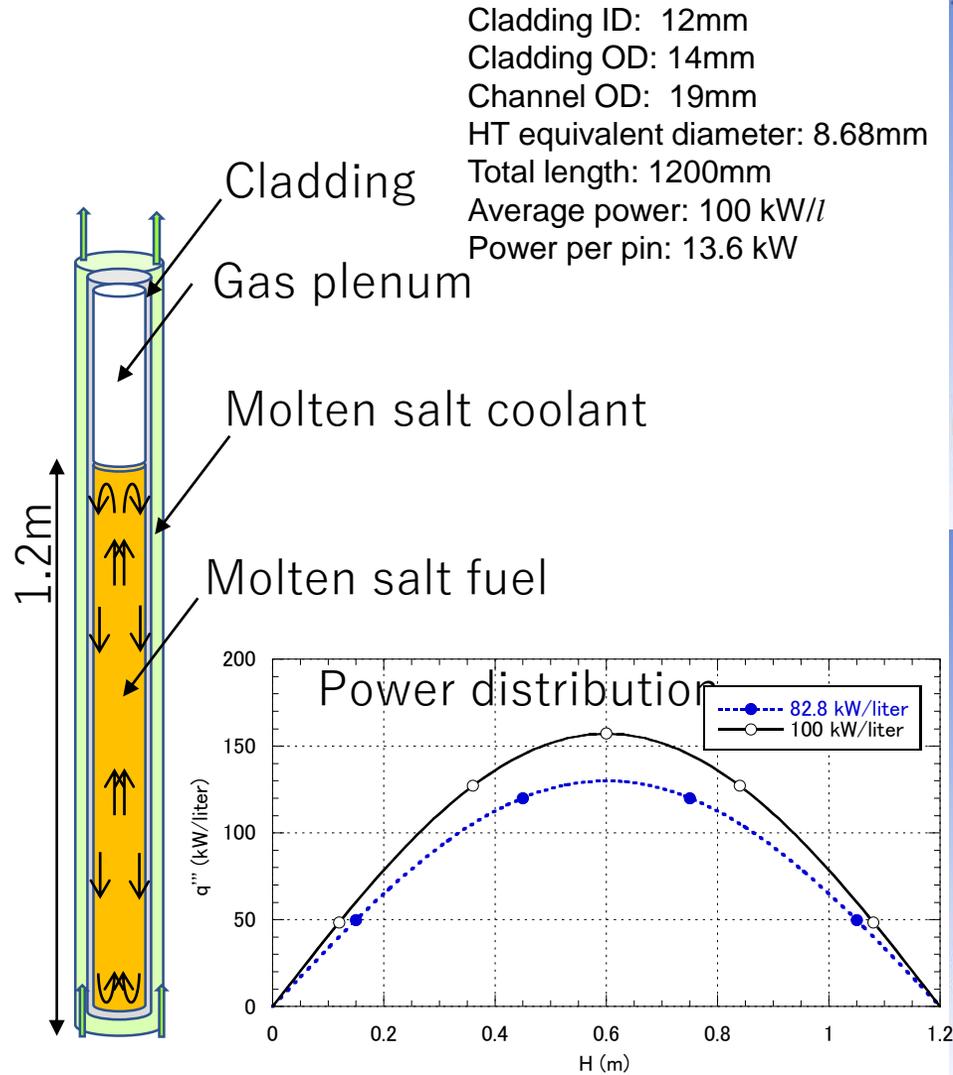
# 円筒型溶融塩炉IMSFR大型炉概念



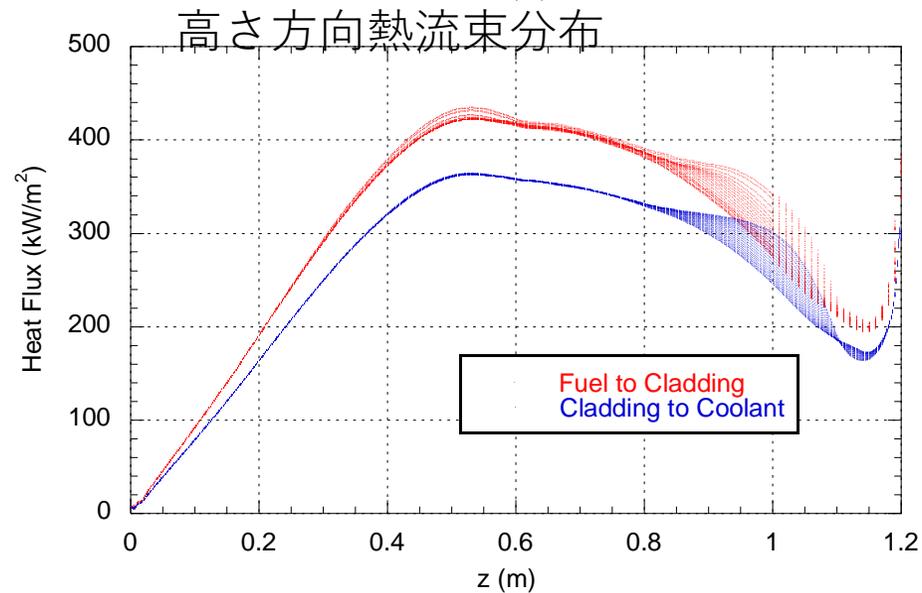
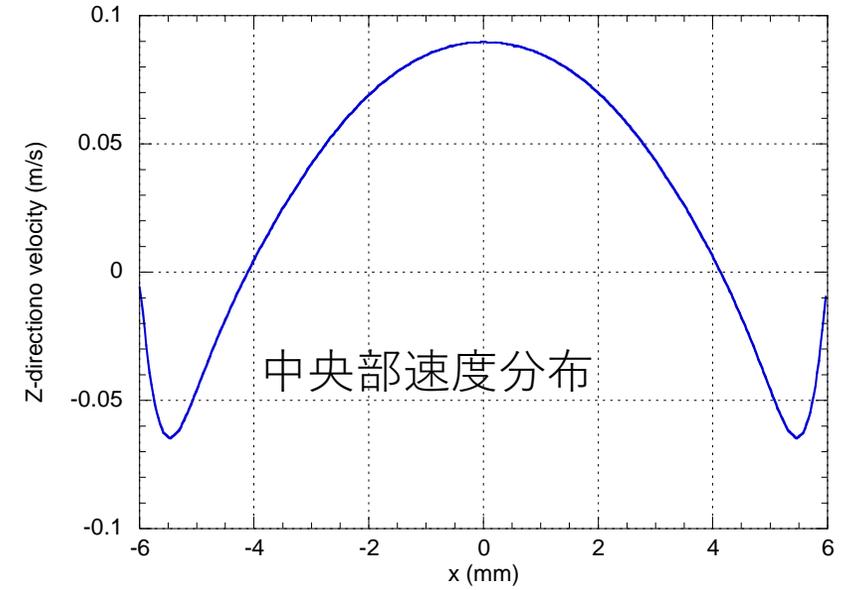
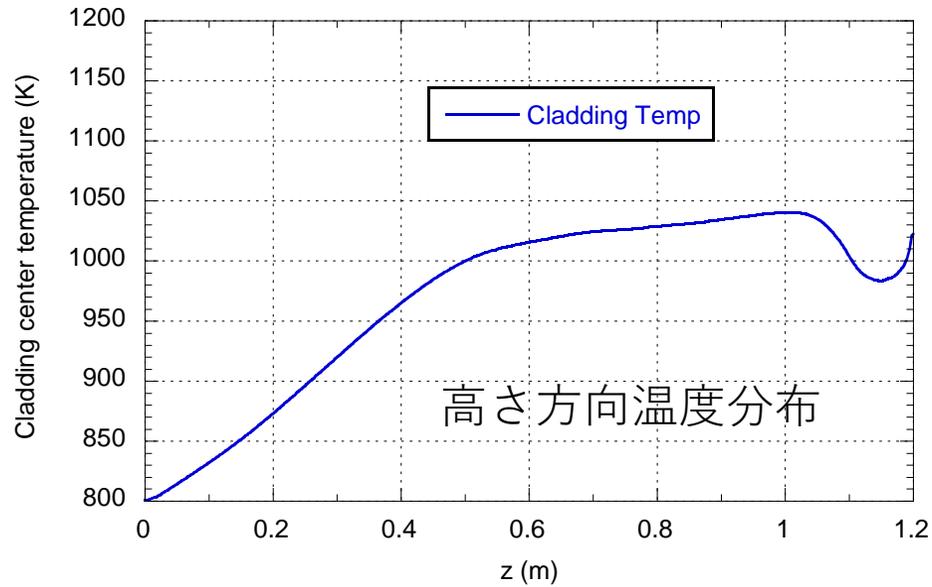
安全性向上のため、2次系に溶融塩、3次系に超臨界CO<sub>2</sub>ガスタービンシステムとすることも選択肢



# 被覆管内熔融塩の解析モデル(内径12mm) 望月(東工大、BERD)



# 高さ方向温度分布、熱流束分布、中央部速度分布(内径12mm) 望月(東工大、BERD)



# 解析の条件と結論

## 「もんじゅ」の経験を活用できる

- 解析体系は、固体の塩化物燃料をピンに入れて集合体にして組み上げ炉心に入れて溶融塩燃料となる場合。燃料高さ $H=1.2\text{m}$
- ピンの出力は、平均出力が約83および100 kW/literのCosine発熱分布を仮定する。出力分布は、 $q'''=1.3 \times 10^2 \sin(\pi z/H)$ ,  $q'''=1.57 \times 10^2 \sin(\pi z/H)$  kW/literで計算する。
- 物性値は、現在判明している密度、体積膨張係数、比熱、粘性係数、熱伝導率を使う。  
 $\rho = 3135\text{kg/m}^3$  at 773K, 2550 at 1423 K,  $b=3 \times 10^{-4}$  1/K,  
 $C_p=837.36$  J/kg K,  $k=0.86537$  W/m K,  $\mu=0.0042$  Pa s
- 約100Kの温度上昇となるように冷却材側のギャップを仮定する。
- ピンの内側は層流、外側は乱流になっているが、CFD解析ではどちらかのモデルしか選択できないため、妥協案としてk- $\omega$  modelを選択した。
- 「もんじゅ」では、定格出力時の被覆管最高温度を948Kに規制している。ブランケットの場合、973Kである。
- 解析より、明らかに太いピンは溶融塩の熱伝導率が悪いいため高温になり、1000Kを満足するピン内径は、平均出力83および100 kW/literのCosine発熱分布の場合それぞれ約12mm、8mm以下である。
- 出力を上げる場合、ピンの太さを大きくすることはできず、ピン本数を増やして対応する。

# IMSFRの特徴

- 塩化物燃料溶融塩炉と乾式処理の組み合わせ
- 溶融塩/液体金属 (Bi, Ga, Cd)系によるFPとアクチニドの抽出
- 塩素ガスは不使用
- 比較的低温の運転 (炉心入口温度～500C)により、ゼオライト、液体カドミウム使用可能 (IFR仕様の活用)

# IMSFRのメリット

- 高度な安全性（過酷事故フリーを目指す）  
原理的にメルトダウンが起きない、水素爆発、水蒸気爆発はまず起きない
- バックエンド処理の柔軟性  
→ TRUの高効率な核変換処理（液体燃料のメリット, デブリ処理へ適用も）
- 多目的利用への期待  
→ 核変換炉、再エネバックアップ電源、発電炉、熱供給炉、他
- 小型炉への期待
- 経済性向上への期待  
→ 燃料製造、再処理、廃棄物処分コスト低減
- 英米の企業、研究機関等との連携協力は有効

# 総括

◆ 原子カイノベーションの一環として溶融塩炉の開発への国のサポート（GAIN型支援を含む）を期待したい：

- ・ バックエンド対策用溶融塩炉、即ち統合型溶融塩高速炉（IMSFR）の開発を先行
  - ・ IMSFRは、過酷事故フリーに限りなく近い安全性を期待できる
  - ・ IMSFRは、放射性廃棄物TRUの高効率な核変換処理を期待できる
- ・ IMSFRが一度開発されれば、再エネバックアップ用への利用に加え、発電炉、熱供給炉などへの展開が展望でき、輸出も期待される
- ・ 小型炉としても有望
- ・ 経済性も高いと期待できる
- ・ 英米の企業、研究所などと連携協力することは有効である

# システム設計

- 熔融塩燃料の組み合わせによる熔融温度明確化
- 燃料物性（密度、体積膨張係数、比熱、熱伝導率、粘性係数）の明確化  
現在の解析で使用している物性値の出典：  
P.A. Nelson, D.K. Butler, M.G. Chasanov, and D. Meneghetti, Fuel properties and nuclear performance of fast reactors fueled with molten chlorides, Nuclear Applications 3, 1967, 540-547.
- システム解析：NETFLOW++もしくはRELAP5-3Dを利用

# 関連研究課題

- 原子炉反応度特性（温度上昇時のフィードバック）
- 塩化物核データ（燃料、冷却材、MA、LLFP）
- 燃料、MA、LLFPの燃焼特性
- 原子炉の制御方法（制御棒？）
- 循環ポンプの位置（Hot leg or Cold leg）
- 炉停止後の崩壊熱除去方式（IHX内PRACS?）
- 溶融塩燃料ダンプ後の冷却方法  
Ishiguro, T., van Rooijen, W.F.G., Shimazu, Y., Mochizuki, H.,  
Design of a passive residual heat removal system for the FUJI-233Um molten salt reactor system,  
Annals of Nuclear Energy, **64** (2014), 398-407.
- 安全性（異常な過渡変化、事故、シビアアクシデント）
- ステンレス材の溶融塩（FPを含む）による腐食特性
- 燃料の処理速度（? l/min）と乾式再処理
- 核分裂生成気体の処理
- タービン系の流体の選定（水 or CO<sub>2</sub>）
- 溶融塩燃料の保障措置のためのフローモニター開発