



新型炉部会セッション
再生可能エネルギー導入拡大を見据えた
新型炉に期待される新たな技術開発
(4) 蓄熱型高速炉の安全設計技術

○高野 和也(JAEA)

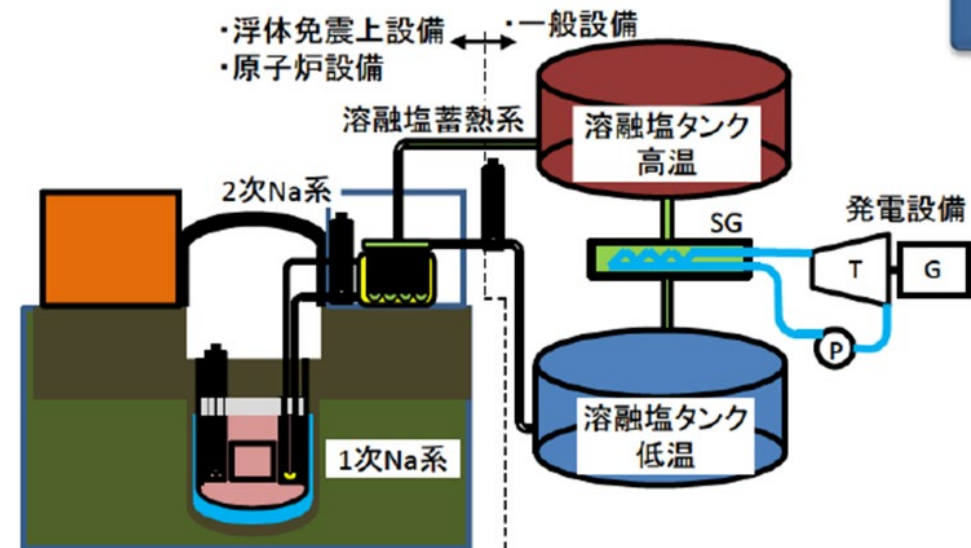
本報告における研究成果の一部は文部科学省原子力システム研究開発事業JPMXD0222682675及び経済産業省社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業補助金の助成を受けたものです。

(背景)

- 原子力イノベーション事業(NEXIP)では、再エネ導入拡大に適応した機動性を要求
→ **溶融塩を用いた蓄熱型高速炉**

(蓄熱型高速炉の特徴)

- ナトリウム冷却高速炉に硝酸系溶融塩を熱媒体とした蓄熱システムを結合し、発電量や時間帯を柔軟に変更可
- ↓
- 再エネの電力供給状況に合わせた発電
 - 蓄熱タンクをバッファとした原子炉側と蒸気タービン側の過渡分離設計



蓄熱型高速炉の概念図

(JAEA, “原子力機構のSMR開発”,

<https://www.jaea.go.jp/04/sefard/faq/files/material0601.pdf>)

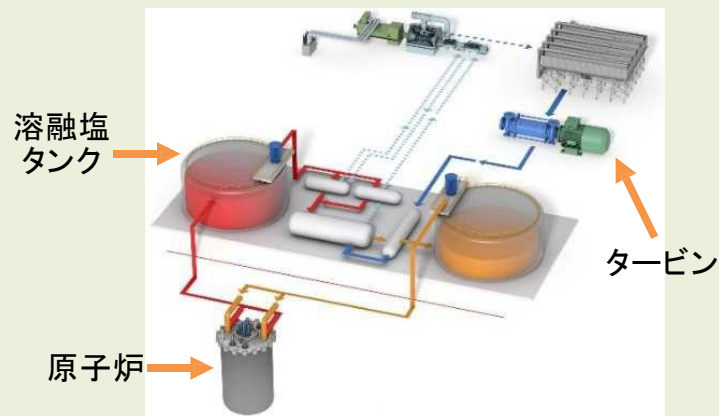
(研究課題)

ナトリウムと溶融塩の熱交換器部分

- ✓ 熱交換器の伝熱特性最適化
- ✓ ナトリウムと溶融塩の接触に伴う反応特性の把握
- ✓ 伝熱管破損時の影響を踏まえたシステム構成の検討

<米国: TerraPower / Natrium™>

- 高速炉の高温と蓄熱性能に優れる溶融塩タンクを組み合わせ、負荷追従が可能。
- 蓄熱システムにより、5時間半以上にわたり、電気出力を34.5万kWから50万kWまで引き上げることが可能。
- 2024年6月、「Natrium™」初号基の建設が米国ワイオミング州にて開始、2030年頃の運転開始を予定

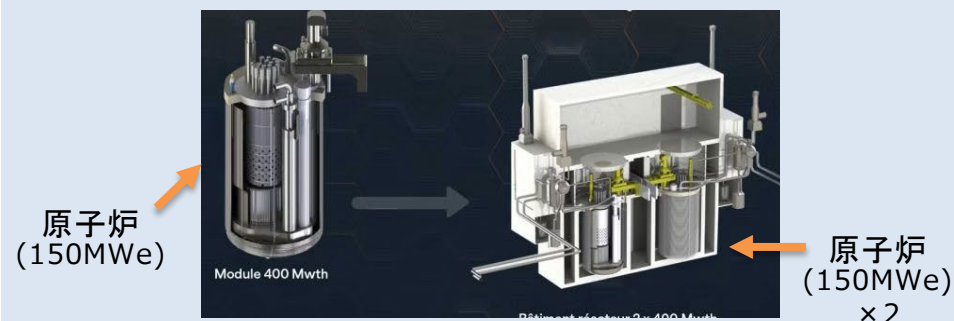


システム概念図

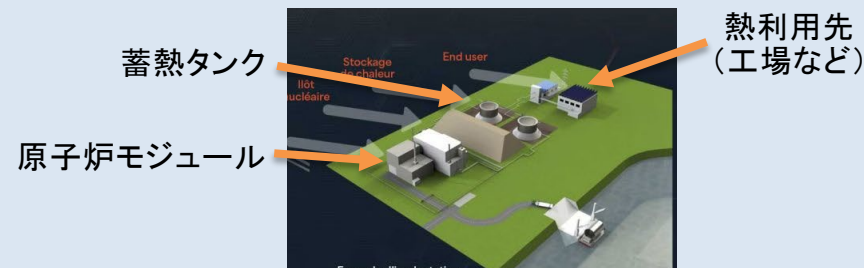
(出典: Terrapower, <https://www.terrapower.com/natrium/>)

<仏国: Hexana>

- CEA発のベンチャー企業
- 2つの小型モジュール型ナトリウム冷却高速炉 (150MWe×2)と蓄熱システムを組み合わせ、発電や産業熱など幅広い利用ニーズに適応



原子炉モジュール概念図



システム概念図

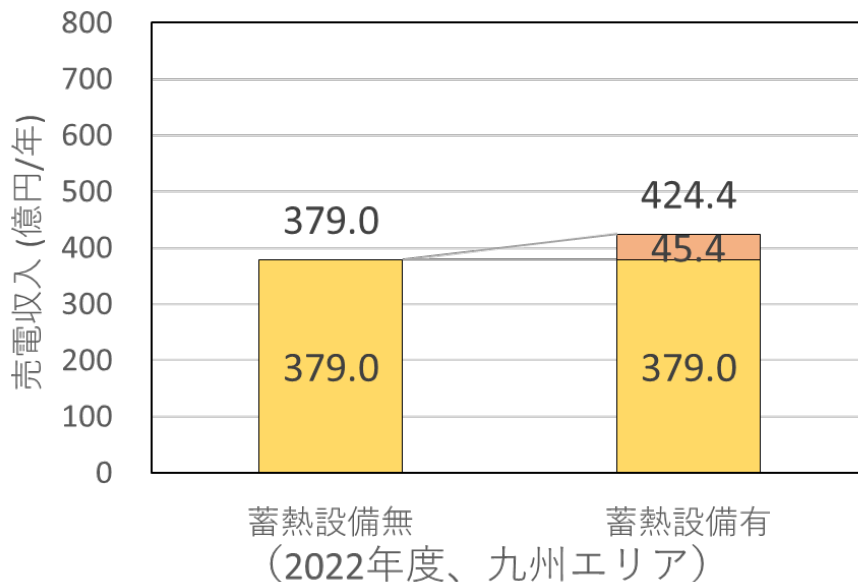
(出典: Hexana, <https://www.hexana.fr/>)

蓄熱型高速炉の経済合理性

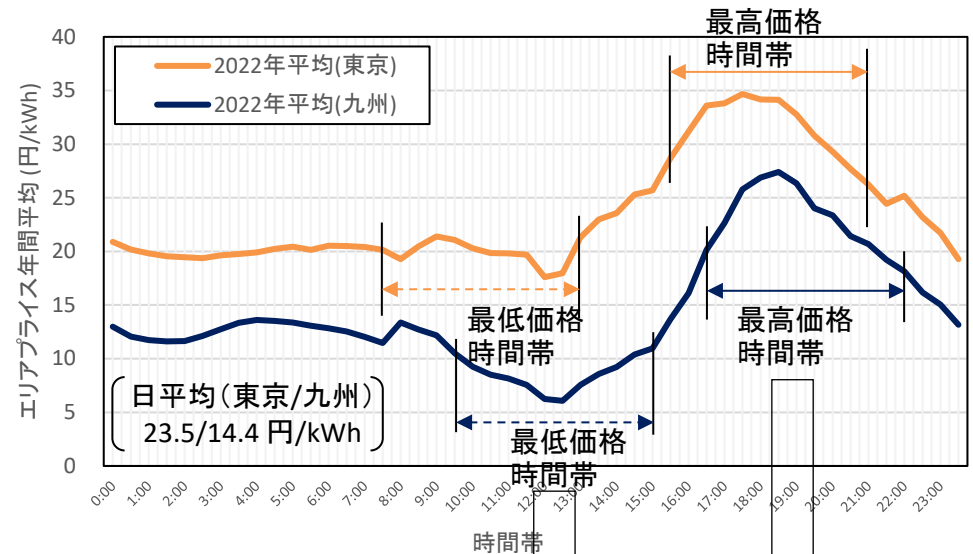
- 蓄熱設備を活用した発電時間帯シフトによる売電収入増加が期待でき、蓄熱型高速炉は経済合理性を有する

試算例：売電収入において**+12%**
(年間+45億円)の増収効果^[1]

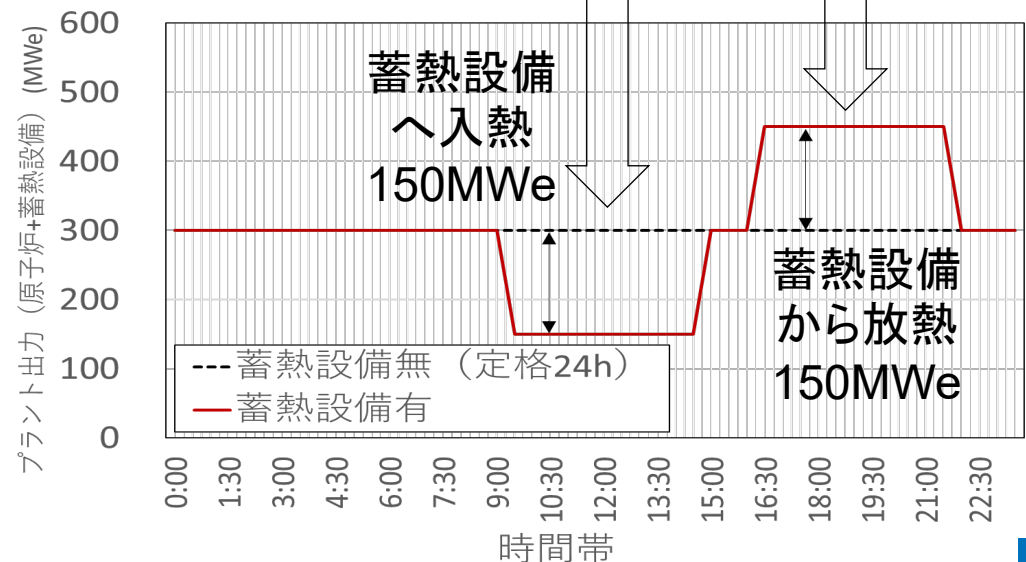
[1] 高野他, “蓄熱式高速炉の売電収入増加効果評価”, 日本原子力学会2024年秋の大会 (2024))



1年あたりの売電収入評価結果^[1]



エリアプライス(2022年度, 時間帯別)^[1]



運転モード(2022年度、九州エリア)^[1]

- 溶融塩蓄熱システムは太陽熱発電で多くの実績がある蓄熱媒体として300-500°Cで比較的安定なSolar Salt ($\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3$ 60-40wt%)が広く用いられている
- 高速炉の運転温度と使用実績等を総合的に考慮してSolar Salt を蓄熱型高速炉の熱媒体候補として選定

500°Cの比重 ρ Na: 832.2kg/m³, Solar Salt: 1770kg/m³ (2.1倍)

500°Cの熱伝導率 λ Na: 67.3W/mK, Solar Salt: 0.539W/mK (1/125倍)

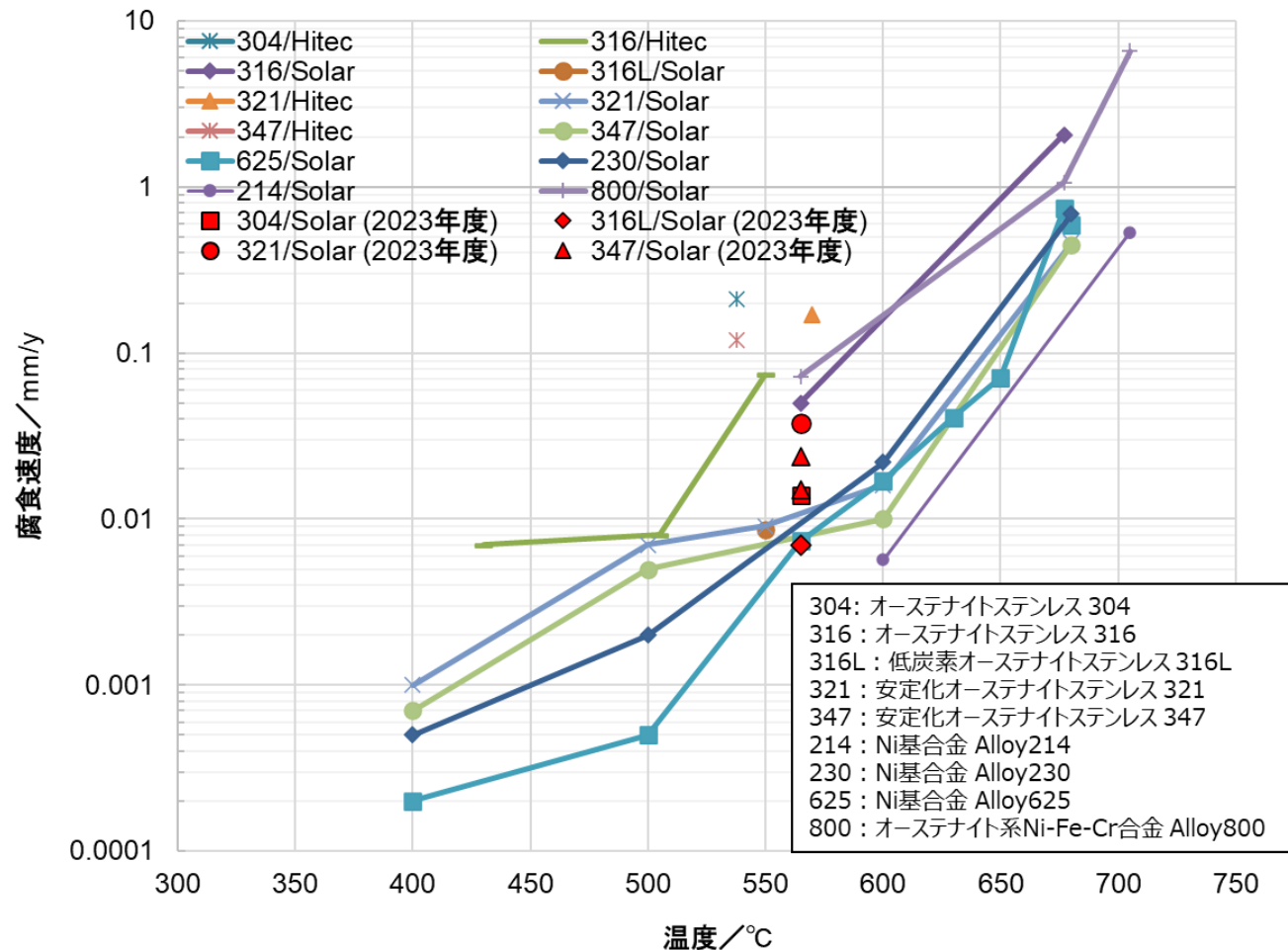
Solar Salt の融点は238°Cと高い

物性値の比較(Na vs Solar Salt) [1][2]

	比重 ρ (kg/m ³)		比熱 c_p (J/kgK)		熱伝導率 λ (W/mK)		動粘性係数 ν (m ² /s)	
温度 (°C)	Na	Solar Salt	Na	Solar Salt	Na	Solar Salt	Na	Solar Salt
300	880	1898	1305	1499	77.1	0.500	3.92×10^{-7}	1.73×10^{-6}
400	856.2	1834	1279	1516	72.2	0.520	3.32×10^{-7}	9.70×10^{-7}
500	832.2	1770	1262	1534	67.3	0.539	2.96×10^{-7}	7.43×10^{-7}

[1] ナトリウム技術読本, JAEA, JNC TN9410 2005-011

[2] ASME TES-1 Safety Standard for Thermal Energy Storage Systems: Molten Salt (2020)



注1) 各値は実施者が異なる複数文献から引用した
 注2) 各値を取得した試験の時間は異なる場合がある
 注3) 凡例の“Solar”はSolar Salt、“Hitec”はHitec Saltを示す

- 温度によって適用可能な材質は異なる。300℃程度等の比較的低温な条件では炭素鋼や低合金鋼を適用できる可能性があるが、高温環境ではオーステナイト系ステンレス鋼やNi基合金の適用が必要と考えられる。
- 500℃以下ではNi基合金の腐食速度が最も小さいが、ステンレス鋼も腐食量としては大きくなく、実用可能なレベルと考えられる。

[2] 林他, “ナトリウム-溶融塩熱交換器を有する蓄熱式高速炉の安全設計技術開発 (2) 熱交換器伝熱性能向上策に関する検討”, 日本原子力学会2023年春の年会 (2024))

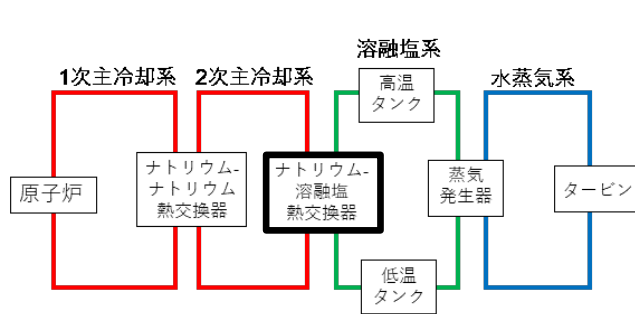
溶融塩ループの構造材選定の留意点

材質 選定	Solar Salt環境では、 全面腐食による減肉を想定する必要 がある。試験データの豊富な565℃以下のSolar Salt環境では、 オーステナイト系ステンレス鋼にて0.05mm/y以下という腐食速度であり、十分耐食的 。具体的には、SUS316系やSUS321、SUS347等が挙げられる。SUS316系では、低炭素系のSUS316Lの方がより耐食的。
腐食代 設定	全面腐食によりある程度均一に減肉していくことが想定されるため、想定される腐食速度と想定耐用年数から、最低必要厚さや安全率等を考慮した腐食代を設定する。ただし、 溶接を伴う場合、母材の場合よりも3倍程度の腐食速度を見込む必要 がある。
不純物の 影響	Solar Salt中に 不純物として塩化物イオンを含む場合 、濃度にもよるが、ステンレス鋼の場合は 腐食速度が3倍程度まで加速される可能性 を考慮する必要がある。
温度条件 の影響	温度一定条件の腐食速度を基準とした場合、290℃⇔565℃程度の変動については特に考慮する必要はない。 短時間で100℃を下回るような急激な温度変動を伴う場合は 、材質によるが 2～3倍程度の腐食速度を想定する必要 がある。

【評価方法】

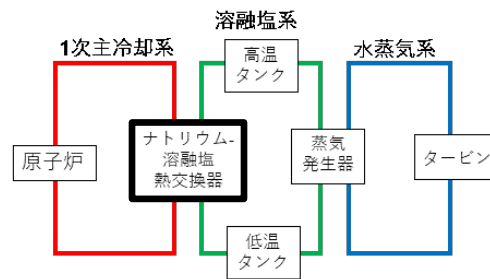
ナトリウム-溶融塩熱交換器における伝熱管破損がプラントに与える影響を「安全性」、「運転保守性」及び「経済性」の観点から、リスクの大きさとしてランク付けを行い、対象概念間で比較・整理し、最も合理的な設計概念を評価。

【検討対象システム概念】



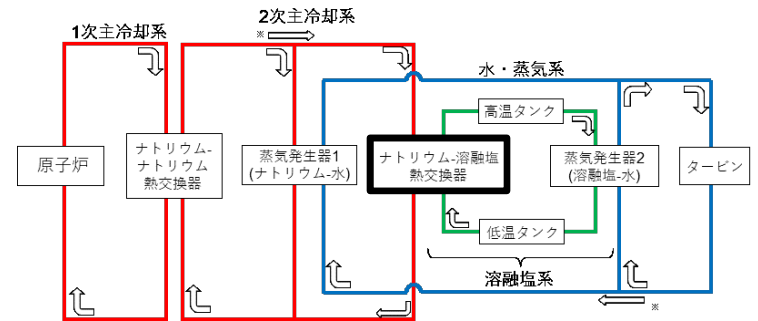
リファレンス設計概念

(1次主冷却系(Na)+2次主冷却系(Na)+溶融塩蓄熱系+蒸気タービン系)
(米国Natrium™と同様の構成)



設計オプション概念1

(1次主冷却系(Na)+溶融塩蓄熱系+蒸気タービン系)
(2次Na系を削除する構成)



◀: 熱媒体 (ナトリウム、溶融塩、水・蒸気) の流れ
※: 運転モード (蓄熱設備及び蒸気発生器1,2の利用状況) に応じて分岐

設計オプション概念2

(1次主冷却系(Na)+2次主冷却系(Na)+溶融塩蓄熱系とNa加熱型SGの並列設置)
+ 蒸気タービン系
(高温ガス炉における水素製造施設の
非「原子炉施設」化に倣った構成)

※いずれの概念もNa系は複数ループ構成、溶融塩系は単一ループ構成を想定。

【評価結果】

観点		リファレンス 設計概念	設計オプショ ン概念1	設計オプショ ン概念2
安全性	外部への放射性物質放散可能性	L	M	L
	ナトリウム-水反応可能性	-	-	M
	許認可リスク	L	H	M
運転保守性	炉心冷却(運転)の継続性	M	H	M
	復旧の容易性	M	H	L
経済性	建設費への影響	M	L	H

※H:リスク高、M:リスク中、
L:リスク小、-:リスクなし



- 1次ナトリウム(放射化)と溶融塩が接触／1次系内に溶融塩が混入する可能性。
- 1次系内への混入溶融塩の除去や影響把握等、復旧は大規模かつ長期間となる可能性。
- ナトリウム加熱型蒸気発生器を備えるが、ナトリウム-水反応可能性に対しては高速増殖原型炉「もんじゅ」と共通であり、同様の安全確保の考え方を採用可能。
- 原子炉熱出力と同規模のナトリウム加熱型蒸気発生器を備えつつ、溶融塩加熱型蒸気発生器を含む溶融塩系の設置が必要。

【結論】

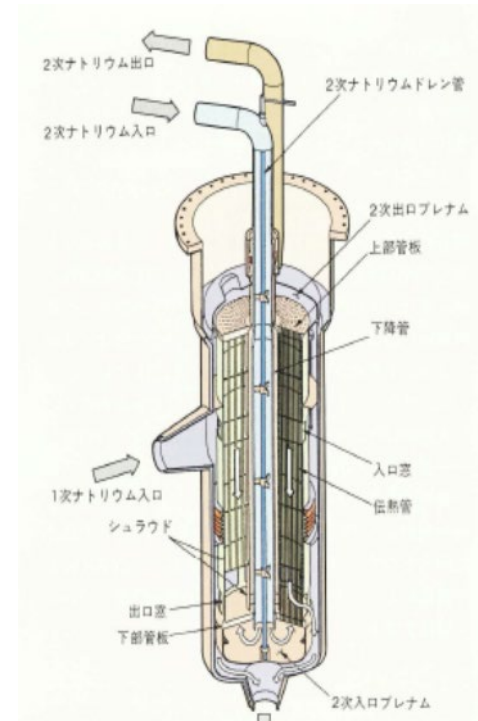
「安全性」、「運転保守性」及び「経済性」の観点から総合的に考えた場合、
リファレンス設計概念(NatriumTMと同様の構成)が最も現実的な概念

【背景】

- Solar Saltは蓄熱媒体として優れているが、熱伝達率は熱伝導率に比例することから熱交換器の伝熱設計では不利となり、**熱交換器の大型化に伴うコスト増大が課題**
- 先行開発している米国Natrium炉の情報は非常に限定的、特に、**熱交換器に関する公開情報はない。**
 - 溶融塩の特性を踏まえて、**伝熱特性を最適化した熱交換器の設計開発が必要**
 - 常陽MK-III 中間熱交換器(Na-Na熱交換器)をベースに伝熱特性向上策を検討

常陽MK-III 中間熱交換器仕様^[5]

型式	縦置きシェル&チューブ平行向流型		
交換熱量(MWt/基)	70		
基数	2		
温度(℃)		入口	出口
	1次側	500	350
	2次側	300	470
流量(kg/h)	1次側	1.335x10 ⁶	
	2次側	1.186x10 ⁶	
伝熱管			
本数	2088		
外径 (mm)	19		
板厚 (mm)	1		
有効伝熱管長(mm)	2930		
材料	316FR鋼		
有効伝熱面積(m ²)	363		
評価用伝熱面積(m ²)	329		



常陽MK-III用主中間熱交換器^[6]

[4] 林他, “ナトリウム－溶融塩熱交換器を有する蓄熱式高速炉の安全設計技術開発 (2) ナトリウム－溶融塩熱交換器伝熱性能評価”, 第28回動エネシンポ (2024)

[5] 常陽MK-III 性能試験, JNC-TN9410-2005-005 (2005)

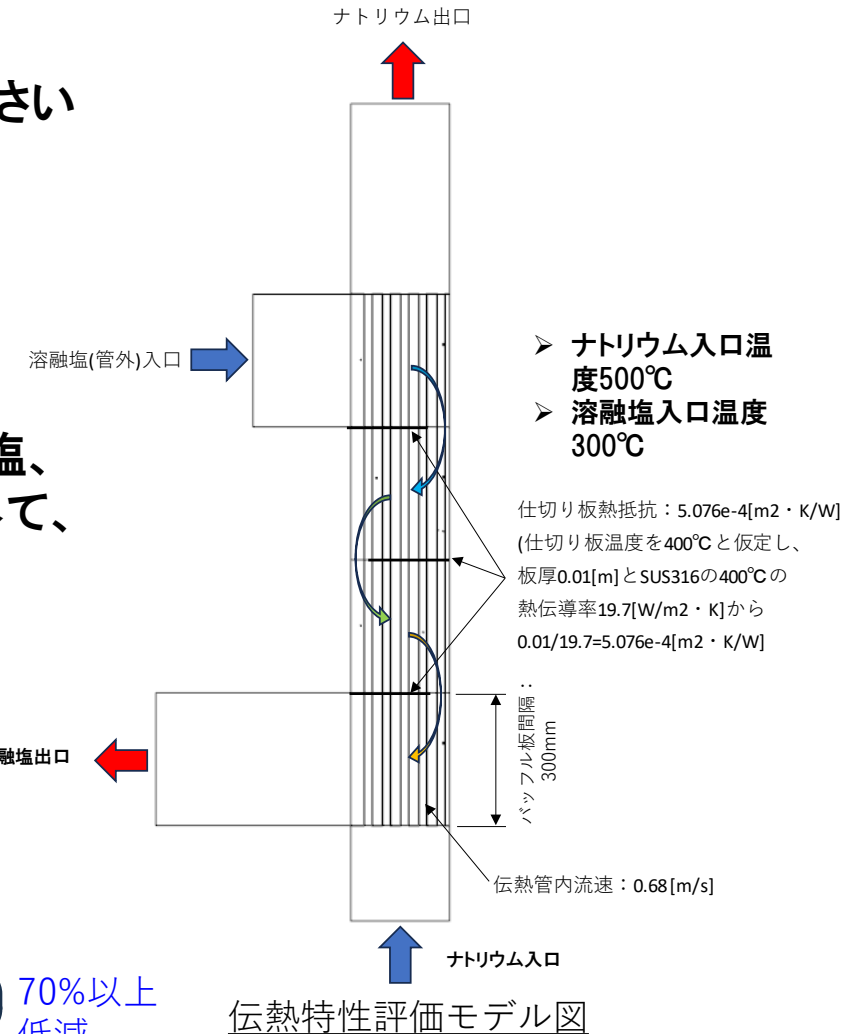
[6] 日立評論 新型炉開発の動向 Vol. 77 (1995)

【伝熱性能向上策の検討例】

- 2次側(管内)を溶融塩とした場合、熱伝導率が非常に小さいため、必要伝熱面積が大幅に増大
→ 1次Na(管外)/2次溶融塩(管内)の伝熱面積：
1801m²(ベース形状の5.5倍、ケース1)
- 伝熱性能向上方策として、1次側/2次側入れ替え＋クロスフロー化(バッフル板間隔300mm)を検討
→ 伝熱面積:563m²(ベース形状の1.7倍、管内を溶融塩、管外をナトリウムに単純に置き換えたケース1に比べて、**必要伝熱面積を70%以上低減**)
- 2次側圧損が増大する見通し、溶融塩ポンプ増強が必要

伝熱性能向上効果の確認結果*)

検討ケース	必要伝熱面積(m ²) (基準ケース比)
ケース1(管内:溶融塩、管外:ナトリウム)	1801(5.47)
ケース2(1次/2次入替クロスフロー化、 バッフル板間隔:300mm)	563(1.71)



*) 熱伝達率の算出には、Na側はLubarsky & Kaufman の式 (出典: 伝熱工学資料(第5版), JSME)、溶融塩側はDittus-Boelter の式 (出典: TEMA, Tubular Exchanger Manufacturers Association, Inc.) をそれぞれ用いた。

背景

蓄熱式Na冷却高速炉では、固有事象としてNaと硝酸系溶融塩との熱交換器部位のバウンダリ破損に起因した、Naと硝酸系溶融塩との化学反応性を把握することが安全評価上重要

蓄熱式高速炉の安全設計及び安全評価に資する知見の整理と基礎試験が必要

反応基礎試験のバックデータとなる硝酸系溶融塩の基本的な熱的挙動を把握することを目的に既存装置を用いた予備試験を実施



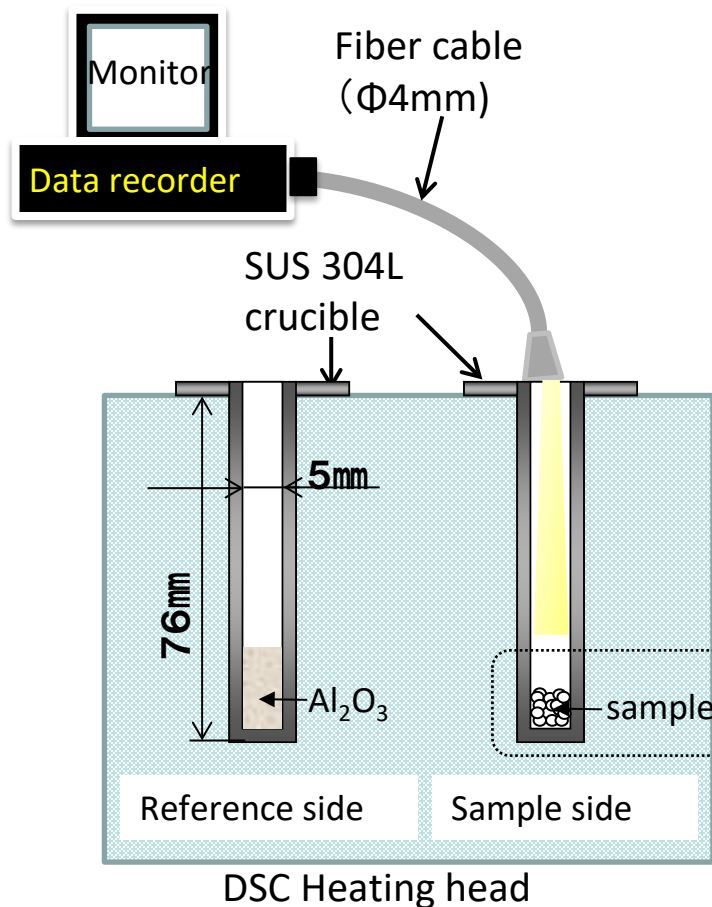
熱分析装置

[7] 菊地他, “ナトリウム－溶融塩熱交換器を有する蓄熱式高速炉の安全設計技術開発 (3) 硝酸系溶融塩とナトリウムの化学反応”, 第28回動エネシンポ (2024)

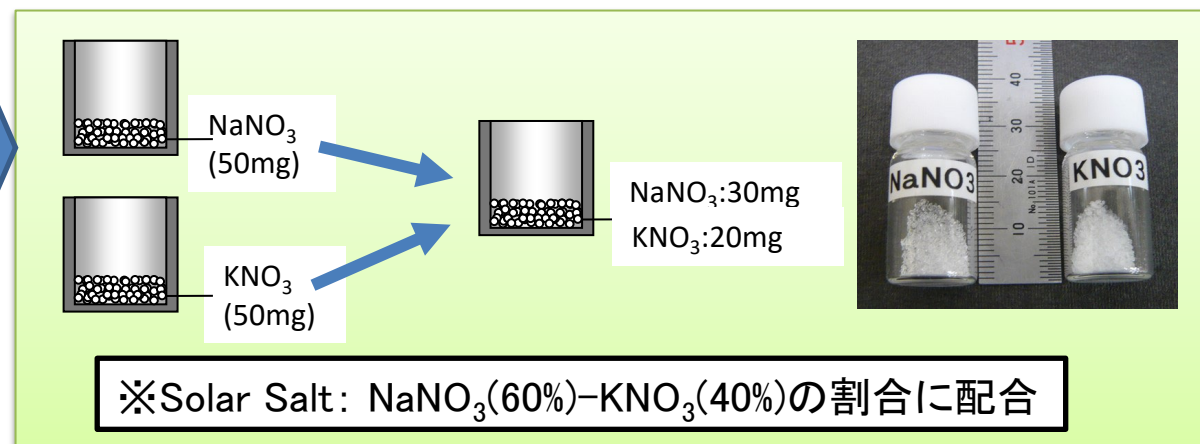
- ◆ 熱分析: 相変化(融点等)、エンタルピー
- ◆ 観察: 試料表面の状況

試験条件

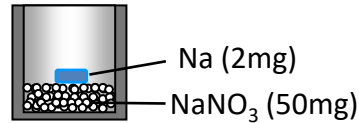
DSC equipment	SETARAM/DSC-111
Crucible	SUS304L (ID:5mm、Depth:76mm)
Sample set	NaNO ₃ / KNO ₃ (50mg)・・・purity 99% Solar salt (30mg NaNO ₃ —20mg KNO ₃)
Heating rate:	5K/min
Heating range:	room temp.～400℃
Pressure	0.1MPa
Videoscope	OLYMPUS IPLEX LX (fiber dia. 4mm)



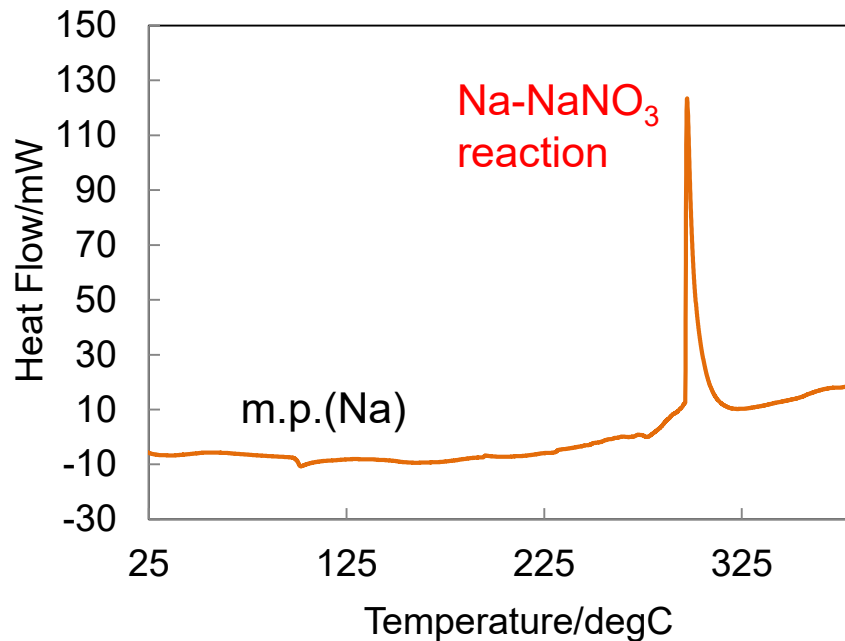
熱分析装置の概要



各試薬の質量: 50mgに対して、
Naを2mgを反応 (5K/min)



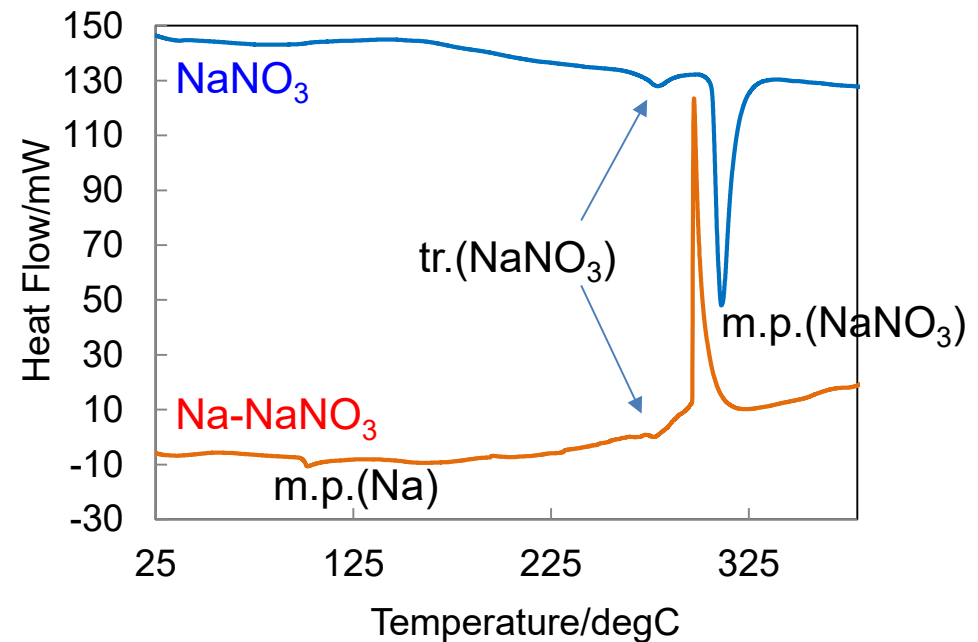
DSC曲線
NaNO₃ (50 mg)-Na (2 mg),
昇温速度: 5 K/min, 試験温度: R.T.~400°C



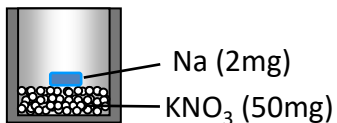
総括反応: $10\text{Na} + 2\text{NaNO}_3 \rightarrow 6\text{Na}_2\text{O} + \text{N}_2$

初期反応: $2\text{Na} + \text{NaNO}_3 \rightarrow \text{NaNO}_2 + \text{Na}_2\text{O}$

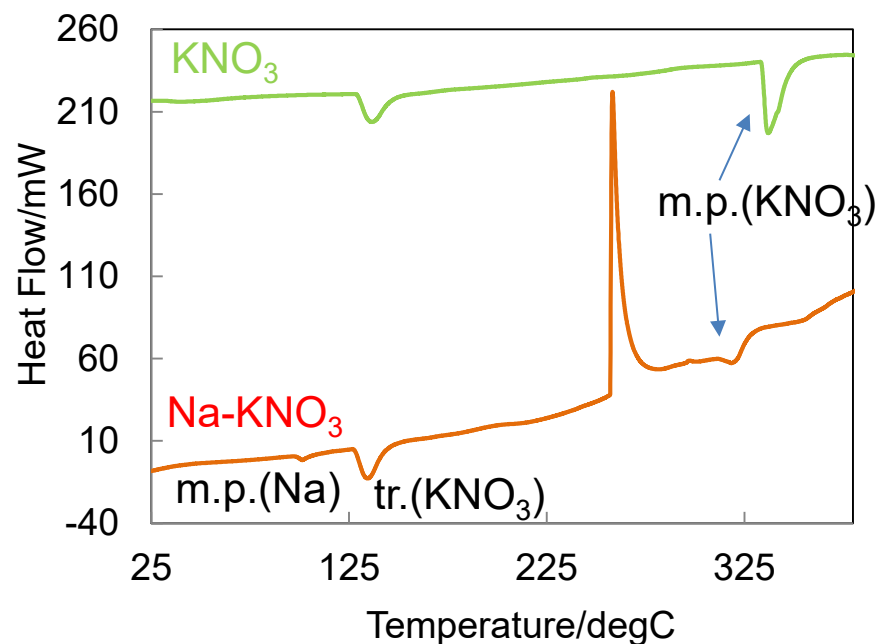
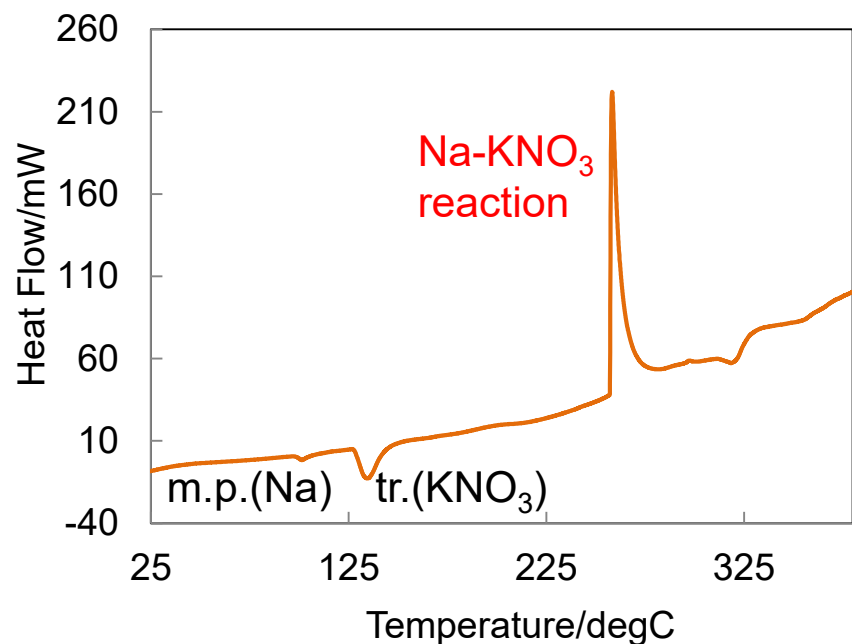
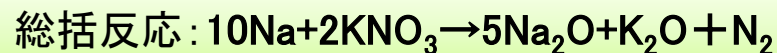
後続反応: $2\text{NaNO}_2 + 6\text{Na} \rightarrow 4\text{Na}_2\text{O} + \text{N}_2$



➡ Na融解後にNaNO₃の相転移を経て、NaNO₃の融解開始温度で反応している
(液相反応: 液体-液体反応)



DSC曲線
KNO₃ (50 mg)-Na (2 mg),
昇温速度: 5 K/min, 試験温度: R.T.~400°C



➡ Na融解後にKNO₃の相転移を経て、KNO₃の融点よりも低温域で反応が始まっている

ナトリウム-溶融塩化学反応 特性要素試験(NEXIP事業)

試験装置の概念設計:

- 熱交換特性試験、ナトリウム-溶融塩化学反応特性試験、反応生成物回収試験を行うため、伝熱管破損時の化学反応の不確かさを考慮するとともに、反応生成物による試験装置への影響を考慮して概念設計

熱流動解析:

- 概念設計を踏まえて、ナトリウム-溶融塩化学反応特性試験装置全体の熱流動特性及び熱交換特性を調べるため、商用解析コード(例えば、STAR-CCM+)等を用いて熱流動解析を実施

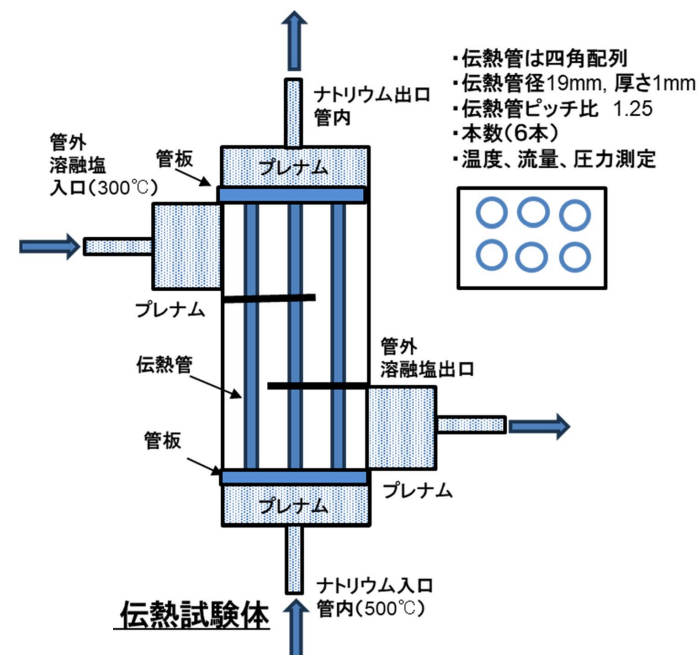
試験計画検討:

- 1年目: 詳細設計、主要機器調達 ←R6現在
- 2年目: 機器製作、熱交換特性試験体製作
- 3年目: 機器製作、現地据付、性能確認試験
- 4年目: 現地据付、試験体据付、熱交換特性試験、試験体製作
- 5年目: 試験体交換及び化学反応特性試験、試験体製作
- 6年目: 試験体交換及び反応生成物回収試験

溶融塩ループ試験装置基本仕様

定格温度は 450℃であるため、設計温度は 50℃の余裕を持たせ 500℃設定

1) 設計圧力	: 0.5MPa	1) 設計圧力	: 0.5MPa
2) 設計温度	: 550℃	2) 設計温度	: 500℃
3) 定格温度	: 500℃	3) 定格温度	: 450℃
4) 熱交換器入口温度	: 最大 480℃	4) 熱交換器入口温度	: 最小 300℃
5) 熱交換器出口温度	: 最小 360℃	5) 熱交換器出口温度	: 最大 460℃
6) 定格流量	: 50L/min	6) 定格流量	: 50L/min
7) 主配管径	: 1B	7) 主配管径	: 1B
8) Na 保有量	: 400kg	8) 溶融塩量	: 200kg
9) 材質	: SUS316	9) 材質	: SUS316



- 溶融塩蓄熱システムを接続したナトリウム冷却高速炉は、再生可能エネルギーの変動性に対応できる調整力を持ったエネルギーシステムであり、再エネ導入拡大に適応する機動性を有する概念として日米欧で開発が進められている。
- 蓄熱型高速炉の開発課題はナトリウムと溶融塩の熱交換器部分であり、溶融塩環境での構造材選定指針、ナトリウム－溶融塩伝熱管破損の影響評価を踏まえた安全設計方針、ナトリウム－溶融塩熱交換器の伝熱性能最適化設計、ナトリウムと溶融塩の化学反応メカニズムの解明について研究開発が進められている。
- 今後、要素試験やモックアップ試験に拡張し、技術開発が進展され、蓄熱式高速炉が実用化されることが期待される。