



HITACHI



令和8年1月14日
令和7年度 原子力システム研究開発事業
成果報告会

未来へげんき
To the Future / JAEA

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

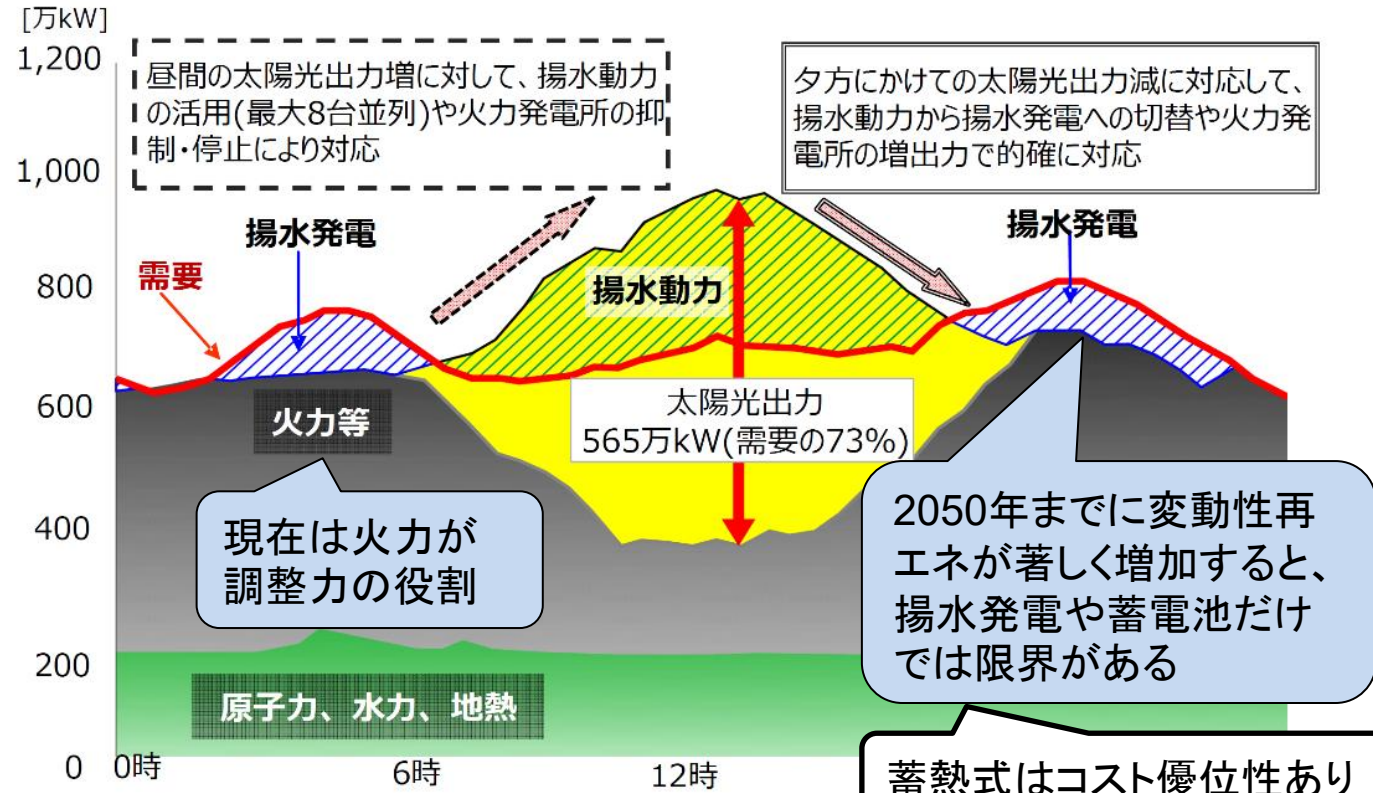
研究代表者：日本原子力研究開発機構
高速炉・新型炉研究開発部門
山野 秀将

研究実施機関：

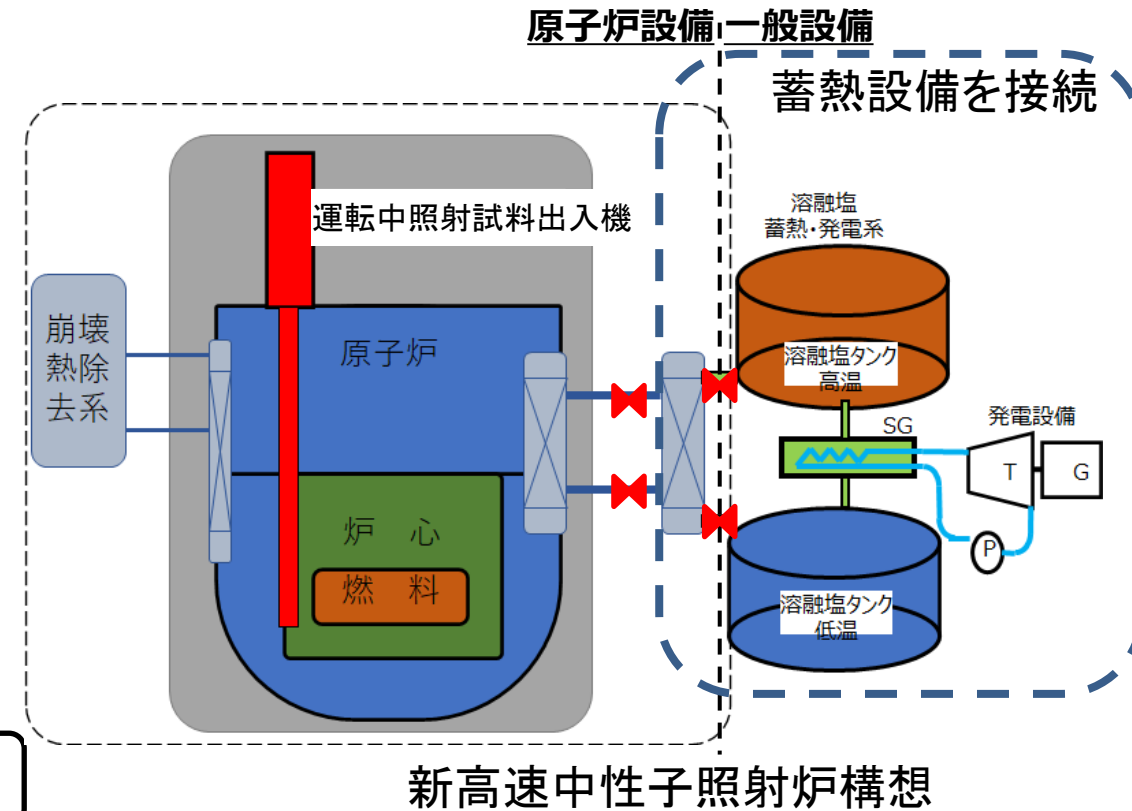
日本原子力研究開発機構
日立GEベルノバニュークリアエナジー（株）

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**が求められている

2017年4月30日の九州の電力需給実績

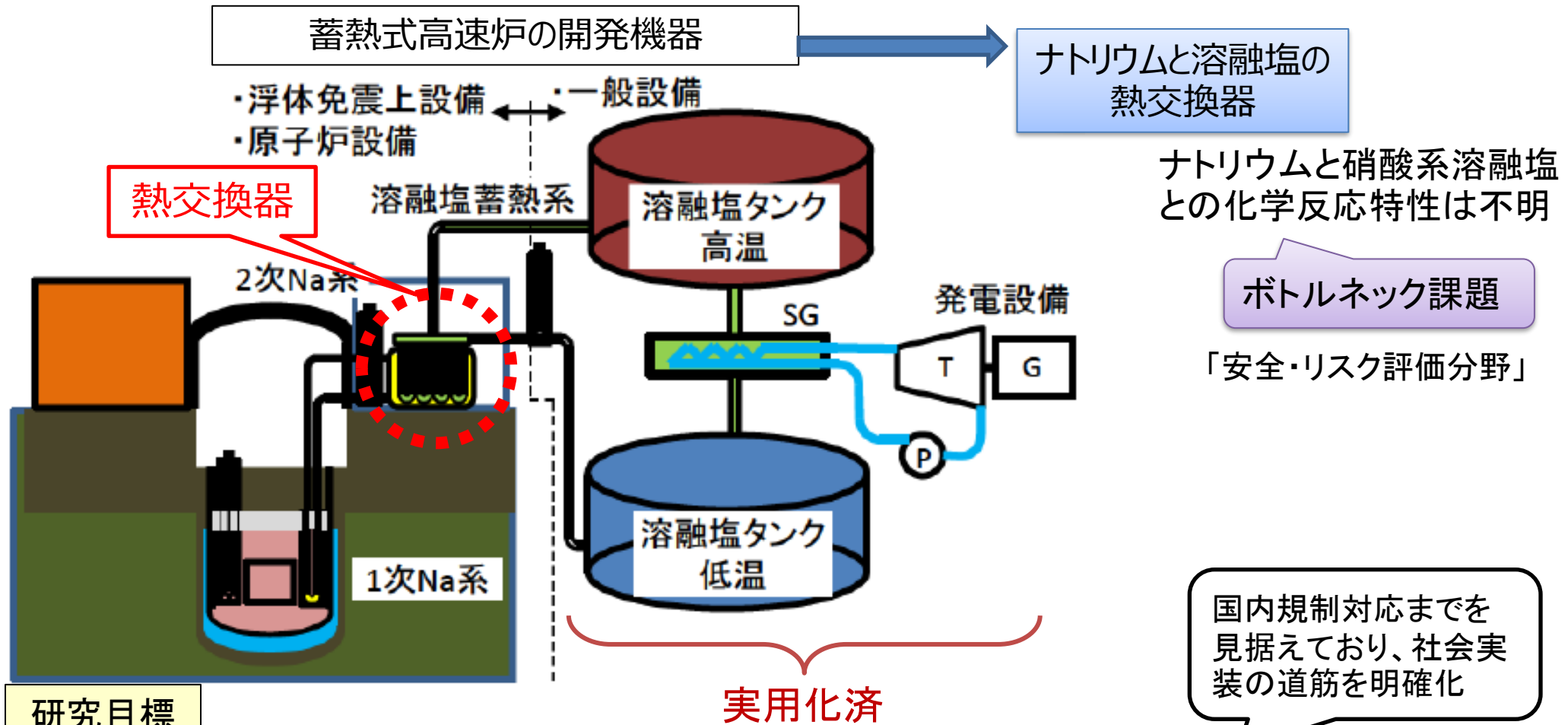


溶融塩蓄熱式高速炉



第7回文科省次世代革新炉研究開発基盤検討会研究会(2023/2/15)
https://www.mext.go.jp/content/20230215-mxt_genshi-000027578_2.pdf

蓄熱式高速炉の熱交換技術及び安全設計技術の開発を目的



- ① 溶融塩蓄熱式高速炉の安全設計方針及びリスク評価技術の開発
- ② 液体金属ナトリウムと硝酸系溶融塩の熱交換性能評価及び熱交換性能を向上させる伝熱向上方策の考案
- ③ 熱交換器でのバウンダリ破損を想定した液体金属ナトリウムと硝酸系溶融塩との間の化学反応特性評価及び安全性向上方策の考案

(1) 溶融塩蓄熱式高速炉の安全設計方針及びリスク評価技術の開発

- 蓄熱式高速炉のリスク評価技術開発の一環として、集光型太陽熱発電システム(CSPシステム)における事故トラブル事例調査結果に基づき、熱交換器並びに溶融塩タンクのトラブル事例件数及び溶融塩暴露時間を整理するとともに、**蓄熱式高速炉における当該機器のトラブル破損発生率を評価**した。
- ナトリウム-溶融塩伝熱管破損がプラントに与える影響を検討し、**「溶融塩蓄熱式ナトリウム冷却高速炉の安全設計方針(案)」**を作成した。

(2) 液体金属ナトリウムと硝酸系溶融塩の熱交換性能評価及び熱交換性能を向上させる伝熱向上方策の考案

- 評価のベースとして、シェル&チューブ式のナトリウム/ナトリウム熱交換器形式を選定。
- クロスフロー化やバッフル板間隔の最適化など伝熱性能向上方策を検討し、部分モデルでの伝熱流動解析により効果を確認。**単純に一方を硝酸系溶融塩に置き換えた場合に比べて、必要伝熱面積を目標値である1/2以下をさらに下回る1/5まで低減可能な見通し**を得た。

(3) 熱交換器でのバウンダリ破損を想定した液体金属ナトリウムと硝酸系溶融塩との間の化学反応特性評価及び安全性向上方策の考案

- 液体金属ナトリウム-硝酸系溶融塩の反応基礎試験体系を構築。
- 硝酸系溶融塩単体及び**ナトリウム-溶融塩の反応性**(約240℃で反応が生じることを観察)について、試験データを取得し**反応データベースを構築**するとともに、速度論的解析により反応挙動を予測する見通しを得た。
- 熱暴走の有無、熱的影響、反応時定数、反応後の溶融塩性状に対する評価に基づき、ナトリウム-溶融塩反応に対する**安全性向上方策を提示**した。



ナトリウムと溶融塩の熱交換技術及び安全設計技術開発に係る3カ年研究目標を達成し、溶融塩蓄熱式高速炉実用化に向けた技術基盤整備に貢献

溶融塩蓄熱システムの事故トラブル事例調査

- ✓ 集光型太陽熱発電に使用されている溶融塩 (Solar Salt) を蓄熱媒体とする蓄熱システムを対象に、世界での使用実績及び事故トラブル事例を公開情報に基づき調査し、結果を整理した。

溶融塩蓄熱システムの使用実績の一例 [1]

集光タイプ	集光型太陽熱発電施設	所在国	運転開始年	設備容量 (MW)	集光部の熱輸送媒体	蓄熱方式	蓄熱容量 (h)
Power Tower	Gemasolar Thermosolar Plant / Solar TRES	Spain	2011	20	溶融塩	2-tank direct (蓄熱媒体は集光部の熱輸送媒体である溶融塩)	15
	Crescent Dunes Solar Energy Project	United States	2015	110			10
	Shouhang Dunhuang Phase I - 10 MW Tower	China	2016	10			15
	NOOR III	Morocco	2018	150			7
	Shouhang Dunhuang Phase II - 100 MW Tower	China	2018	100			11
	CEEC Hami - 50MW Tower	China	2019	50			13
	LuNeng Haixi - 50MW Tower	China	2019	50			12
	Atacama I / Cerro Dominador 110MW CSP + 100 MW PV	Chile	2021	110			17.5

Solar Two施設における事故トラブルの一例 [2]

発生部位	トラブルの内容	原因
配管	プロセス装置及び配管	腐食 (Corrosion)
	蓄熱システムの8インチ径のタンクベントライン	2年間に完全閉塞した 恐らく0.3mの配管セクションに予熱ケーブルが敷設されていなかったことから溶融塩の蒸気が凝縮され、長期間かけて凝縮層の厚みが増したことがベントライン閉塞の原因である。
	蓄熱システムのプロセスラインと圧カトランスデューサをつなぐ隔離弁を有する計装配管 (1インチ径)	溶融塩の凍結 不適切な予熱 スタグナントラインにおける断熱材の極小欠陥、又は予熱ケーブル出力の僅かな低下が原因。

太陽熱発電の良好事例研究に記載されたTower型施設での事故トラブルの一例 [3]

発生部位	トラブルの内容	原因
蓄熱システム	高温溶融塩タンク (2つの施設で発生)	破損、タンクの床における漏えい タンクの建設エラーが原因と報告されているが、床と基盤間の摩擦力も原因の可能性もある等、他の複数の原因の組合せの可能性もありえる。
	配管	溶融塩の凍結 予熱ヒータシステムの問題が原因。①ヒータのコストダウンのため定温維持に必要な最小限の (すなわち、放熱の微増に対して不十分な) 予熱能力を設計したことと断熱材の僅かな劣化の重畳で凍結に至る。②長期に亘る弁軸シール漏えいによりヒータケーブルへ付着した塩が分解して液体状の窒素酸化物を生じ、これがヒータケーブルシースの腐食・破損させ、シース内へ湿分が流入してケーブルが破損に至り、結果として軸シール漏えいを生じる弁及び近傍の配管で凍結に至る。
	弁	軸シール漏えい 原因でなく影響: シール漏えいによって断熱材が汚染され、熱損失の増大をもたらしている。また、溶融塩は予熱ケーブルの運転温度で腐食分解生成物を生成し、ケーブルの急速な破損をもたらしている。

[1] <http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/>

[2] James E. Pacheco (editor) "Final Test and Evaluation Results from the Solar Two Project," Sandia National Laboratories, SAND2002-0120, Appendix P, January 2002.

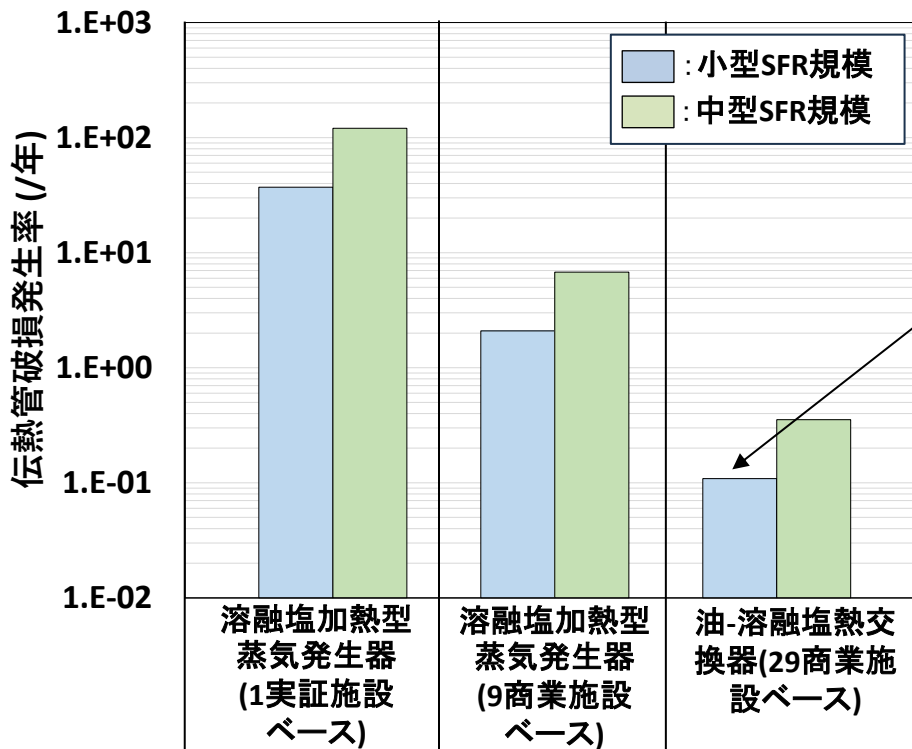
[3] Mark Mehos, Hank Price, Robert Cable, David Kearney, Bruce Kelly, Gregory Kolb, and Frederick Morse, "Concentrating Solar Power Best Practices Study," National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-5500-75763, June 2020.

中小型SFR規模での伝熱管破損発生率評価例

【評価方法】

- 小型SFRとして200MWe(約560MWt)規模、中型SFRとして650MWe(約1800MWt)規模の蓄熱設備を備えるシステムを仮定。
- 前述の伝熱管破損発生率(/年・MWt)に蓄熱設備熱出力を乗じて、小型SFR規模、中型SFR規模相当の熔融塩加熱型蒸気発生器及び油-熔融塩熱交換器の伝熱管破損発生率(/年)を評価。

【評価結果】



中小型SFR規模の伝熱管破損発生率(/年)評価例

ナトリウム-熔融塩熱交換器に係る洞察

- 水以外の流体と熱交換を行う点で油-熔融塩熱交換器と類似性が高いと考えれば、560MWt(200MWe規模の小型SFR相当)で10年に1回程度の破損発生率となりうると推測。
- 原子力設備として設計する上では信頼性の向上が必要。

溶融塩材、構造材、カバーガスの選定方針

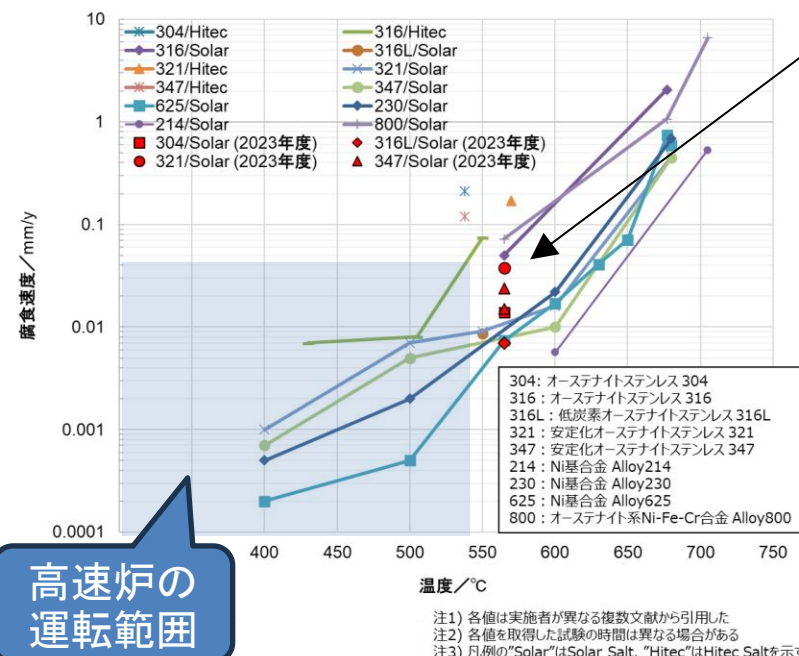
- 溶融塩材： 太陽熱蓄熱発電システムで多くの利用実績があり、当該システムでの利用温度範囲が高速炉の冷却材温度範囲と調和している**硝酸系溶融塩**を用いる
- 溶融塩内包機器や配管の構造材料： 硝酸系溶融塩の構造材腐食性に対する調査結果に基づき、耐溶融塩腐食性に優れた**オーステナイト系ステンレス鋼**を用いる
- 溶融塩材の自由液面は**空気**で覆う設計とする

ナトリウム冷却高速炉と太陽熱蓄熱発電システムの熱輸送媒体温度範囲の比較

もんじゅ原子炉出入口温度 397～529℃

太陽熱蓄熱発電システム(*)
における硝酸系溶融塩の
利用温度範囲 **280～560℃**

(*) Power Tower型の一般的な太陽熱蓄熱発電システムを想定



オーステナイト系ステンレス鋼の腐食速度は565℃以下で0.05mm/y以下であり十分な耐食性あり

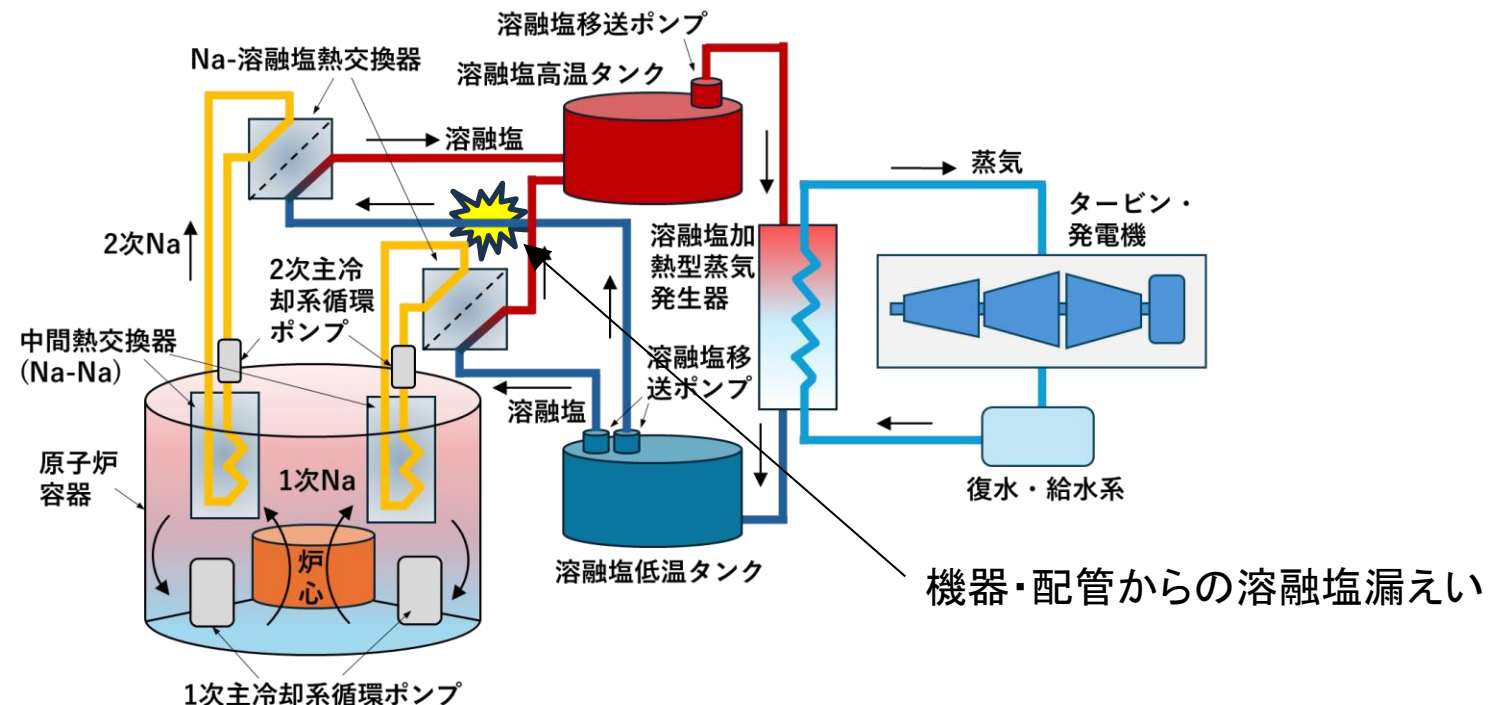
溶融塩中の構造材腐食量は500℃以下で実用可能なレベル

硝酸系溶融塩における各種材料の全面腐食速度に係る文献報告値^[4]

[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) 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)

溶融塩の漏えい監視及び漏えい検出時対応

- 溶融塩系機器・配管から系外への溶融塩漏洩については、機器・配管の液位計及び流量計により検出
- 漏えい検出時の対応方針：
 - 漏えい部分は弁で隔離して漏えい停止を図る
 - 原子炉は速やかに停止し、崩壊熱除去系による崩壊熱除去運転に移行
 - なお、溶融塩は空気と反応しないため、漏えい溶融塩による2次的な破損拡大防止策の考慮は不要



- 常陽MK-III 中間熱交換器(IHX) をベースに管内Naを溶融塩にした場合に比べて、管内Na、管外溶融塩クロスフロー採用で**伝熱性能を目標の2倍を上回る約3倍に向上した。**
- 管外溶融塩側は伝熱式(Zukauskas) に比べて解析結果の熱伝達率が低い。**バッフル板後流の渦が影響している。**
- 500℃の熱伝導率 λ
Na: 67.3W/mK, Solar Salt: 0.539W/mK (1/125倍)

熱伝達率の比較

Na側熱伝達率(W/m ² K)	35,265	Lyon
	36,691	解析結果
溶融塩側熱伝達率(W/m ² K)	7,135	Zukauskas
	5,553	解析結果

Na溶融塩熱交換器伝熱評価

評価ケース	必要伝熱面積(m ²)
ベース常陽MK-III IHX	329
管内溶融塩, 管外Na	1,801
管内Na, 管外溶融塩 バッフル板間隔300mm	563
管内Na, 管外溶融塩 バッフル板間隔450mm	634

伝熱性能
約3倍

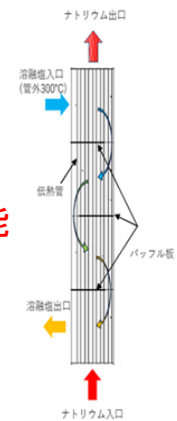


図1 熱流体解析モデル

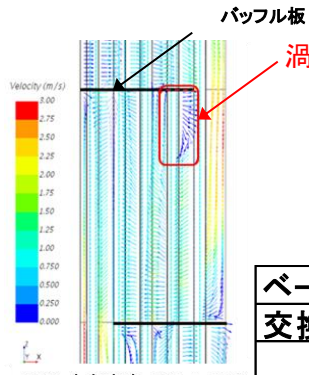


図2 (a)速度ベクトル図
第2段伝熱管10列

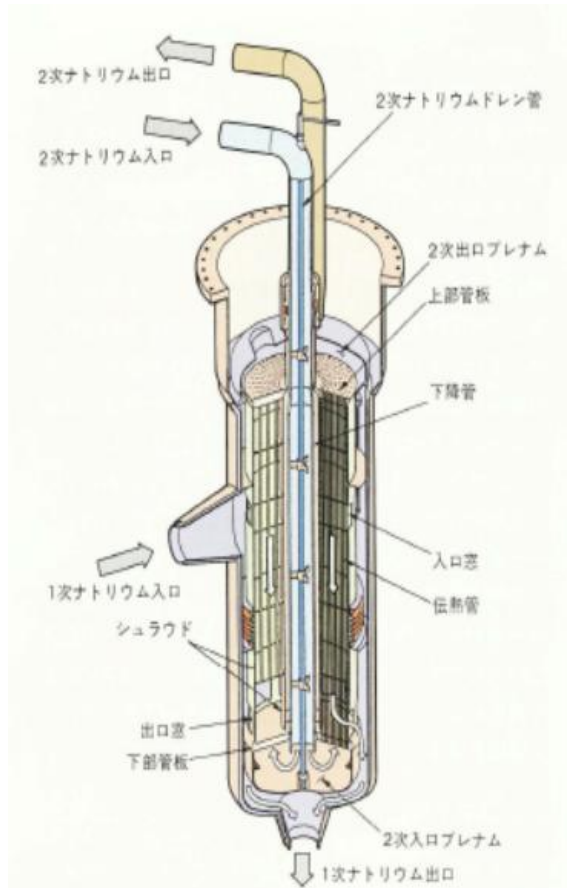


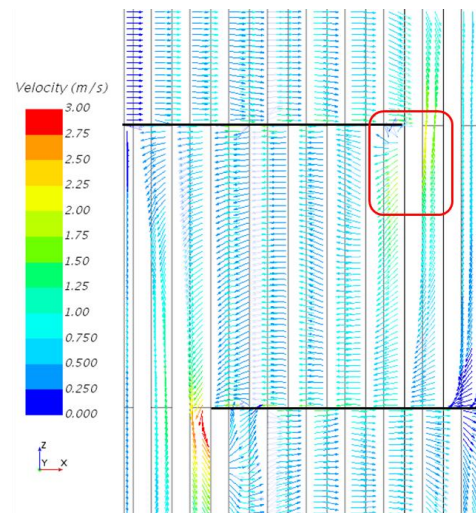
図3 常陽MK-III用主中間熱交換器 [6]

ベースとなる仕様	常陽MK-III中間熱交換器 [5]		
交換熱量(MWt/基)	70		
温度(℃)		入口	出口
	1次側	500	350
	2次側	300	470
評価用伝熱面積(m ²)	329		

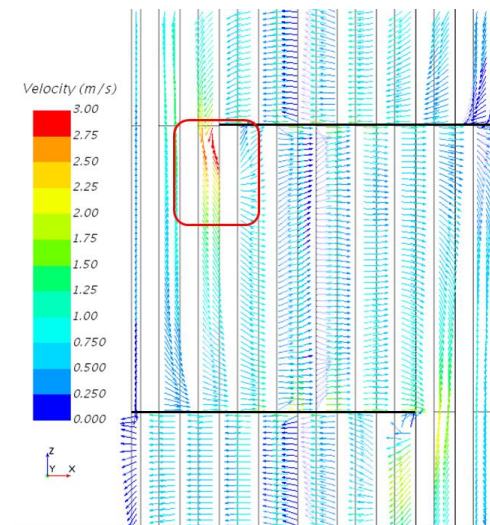
[5] 常陽MK-III 性能試験, JNC-TN9410-2005-005 (2005)

[6] 日立評論 新型炉開発の動向 Vol. 77 (1995)

- 伝熱管18列、開口
伝熱管4列の速度ベクトル図
- ・開口部流速が小さい
- ・バッフル板後流に逆流はなく
渦の低減効果が認められる
- ・クロスフロー部流況が安定
- 管外溶融塩側の熱伝達率の改善が期待できる



ケース1 (300mmリークなし2段目)



ケース1 (300mmリークなし3段目)

- バッフル板間隔
300mm 2段目
- ・開口部流速が大きい
- ・後流に逆流の渦

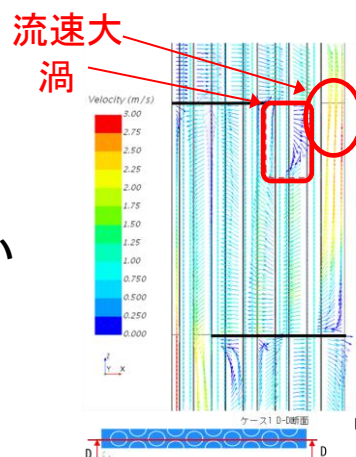
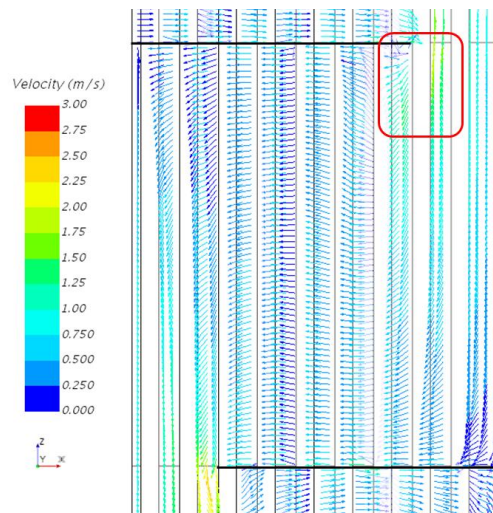
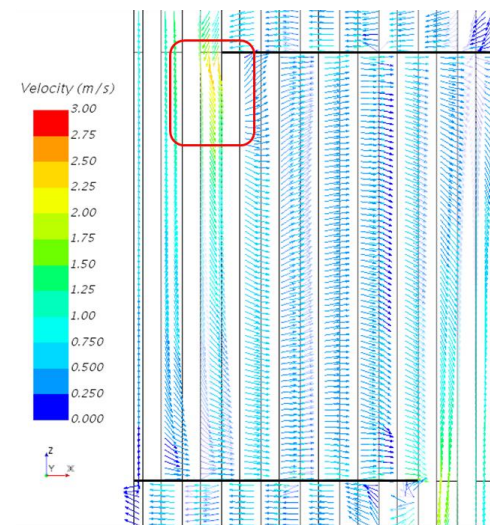


図 速度ベクトル図

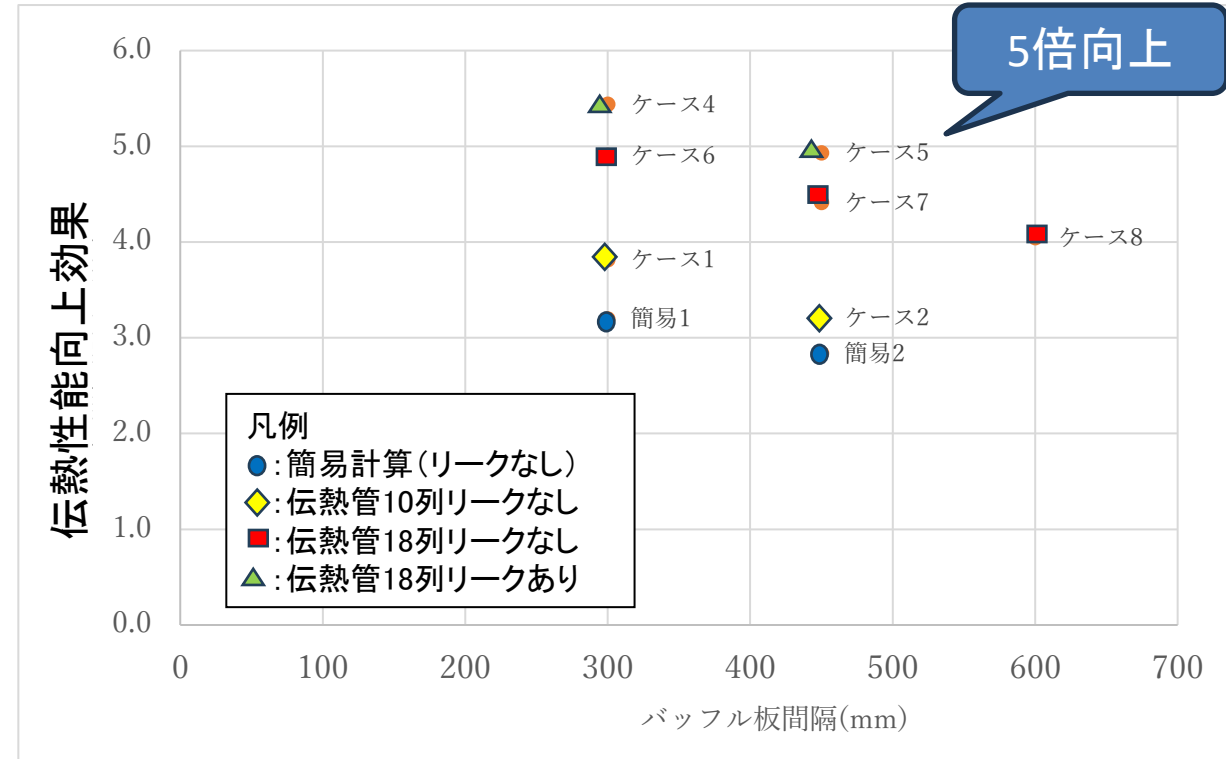
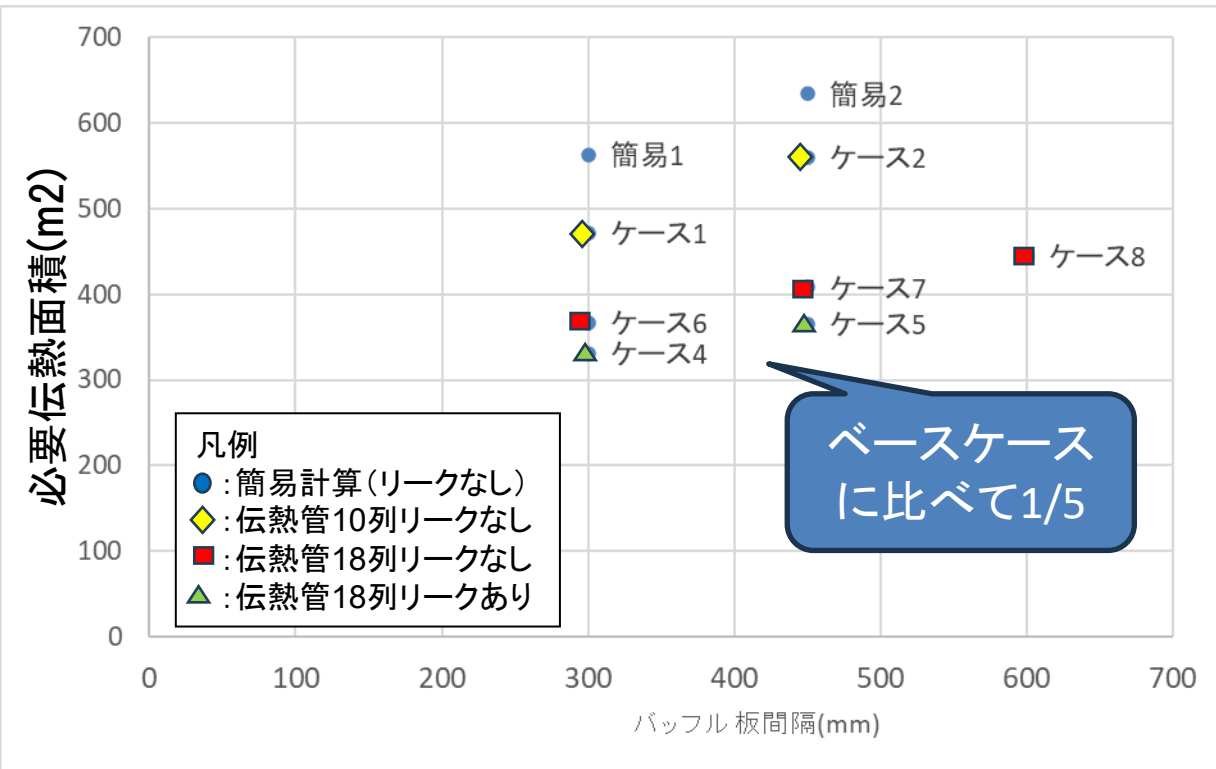


ケース2 (450mmリークなし2段目)



ケース2 (450mmリークなし3段目)

- 伝熱管を10列から18列としてクロスフロー平行部を長く、バッフル板開口部(折り返し部)伝熱管を2列から4列とし窓部流速を減らして渦の低減を図った。伝熱流動解析の結果、流動状況が安定し、渦を抑制することで管外溶融塩側熱伝達率を改善することができた。
- バッフル板と伝熱管や胴ギャップでのリークフローの影響を確認した。バッフル板/伝熱管のギャップを 0.1mm、バッフル板/胴のギャップを0.2mmとした場合、溶融塩側熱伝達率が17%低下した。

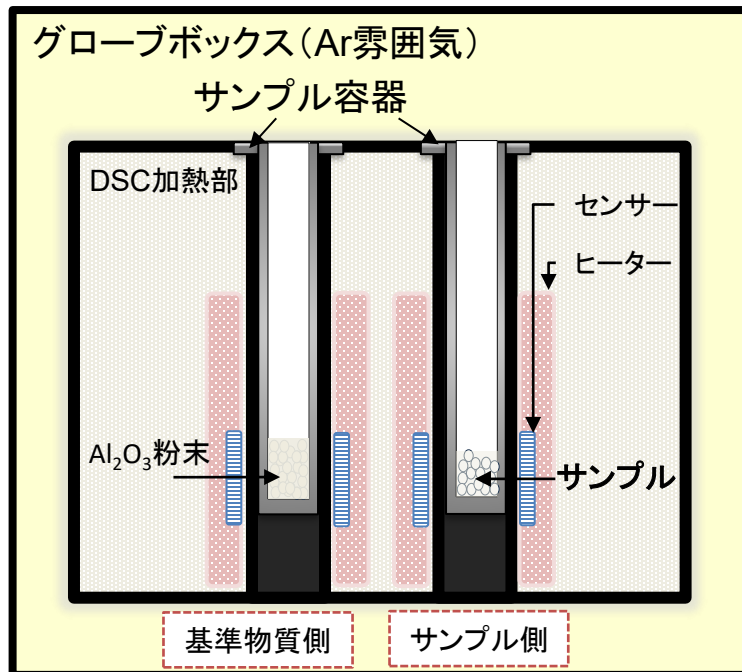


注記) 伝熱性能向上効果は2次系を溶融塩にした場合の伝熱面積 (1,801m²)に対する必要伝熱面積の比率の逆数

試験装置の概要・試験条件

<試験条件>

➤ 示差走査熱量計(DSC)による熱分析



DSC試験装置の概要

温度変化に伴う基準物質・サンプルの熱流の変化を検知



物質の転移温度、反応温度、エンタルピーに関する情報を取得

DSC装置	SETARAM DSC-111
サンプル容器	SUS304L, 内径5 mm × 深さ76 mm
サンプル	NaNO ₃ / KNO ₃ ... 純度 99%以上 Na ... 純度 99%以上
雰囲気	アルゴン (Ar)
昇温速度	2~10 K/min
試験温度	室温 ~ 673 K (400°C)
圧力	0.1 MPa

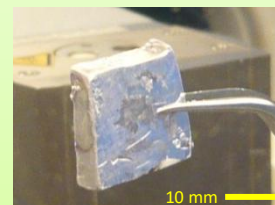
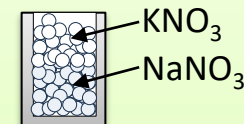
■ 試薬の調製



硝酸塩試薬 (顆粒状)

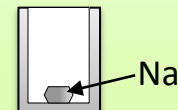
Solar salt: NaNO₃(60wt.%) - KNO₃(40wt.%) に配合

秤量



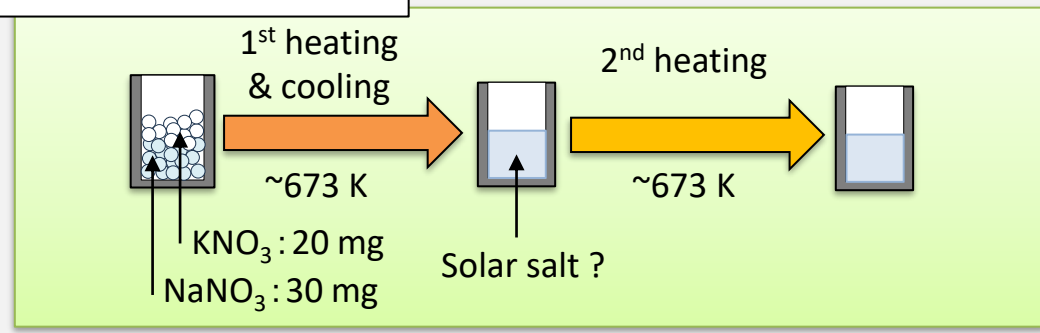
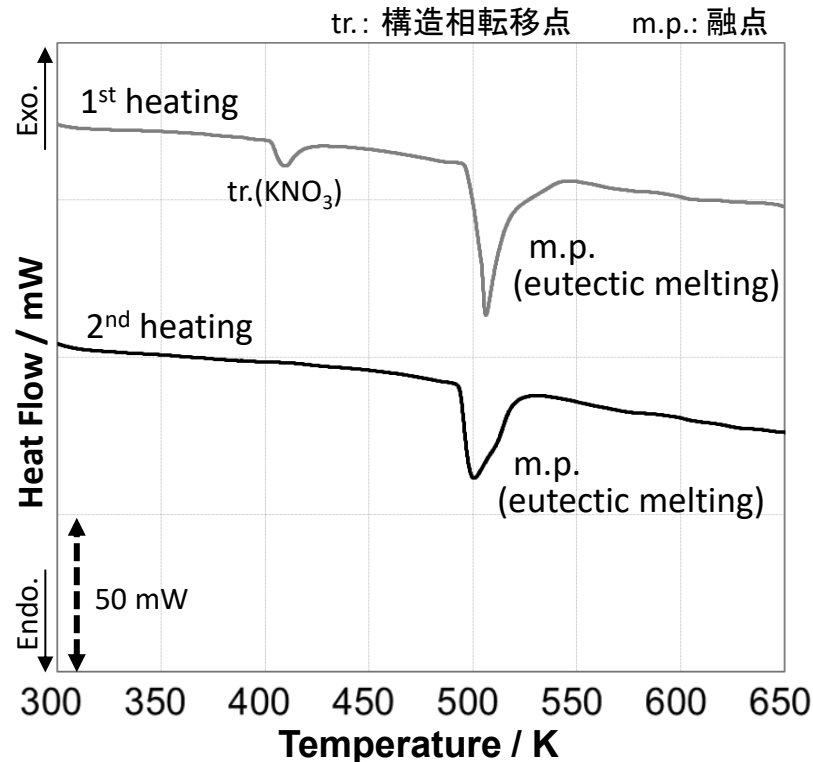
Na試薬 (塊状)

切断・秤量



予備試験結果 (Solar salt)

DSC曲線
 NaNO_3 (30 mg)- KNO_3 (20 mg) —
 Solar salt (50 mg) —
 昇温速度 : 5 K/min
 試験温度 : R.T. ~ 673 K



■ 実測値と文献値の比較

※Yaxuan Xiong et al., Energy Procedia 158 (2019) 5551–5556.

	融解開始温度 K 融解エンタルピー J/g	
	実測値	文献値 (Solar salt)※
1 st heating	501.76 167	491.4
2 nd heating	493.86 116	113.01

1st heatingの熱的挙動は文献値と一致せず、
 Solar saltの性状を再現していない

2nd heatingでは文献値と概ね一致
 Solar saltの性状を再現できることを確認

Solar saltの性状を再現するためには、
 混合した硝酸塩試薬を一度融解・凝固する必要がある

反応試験結果 (Na-Solar salt)

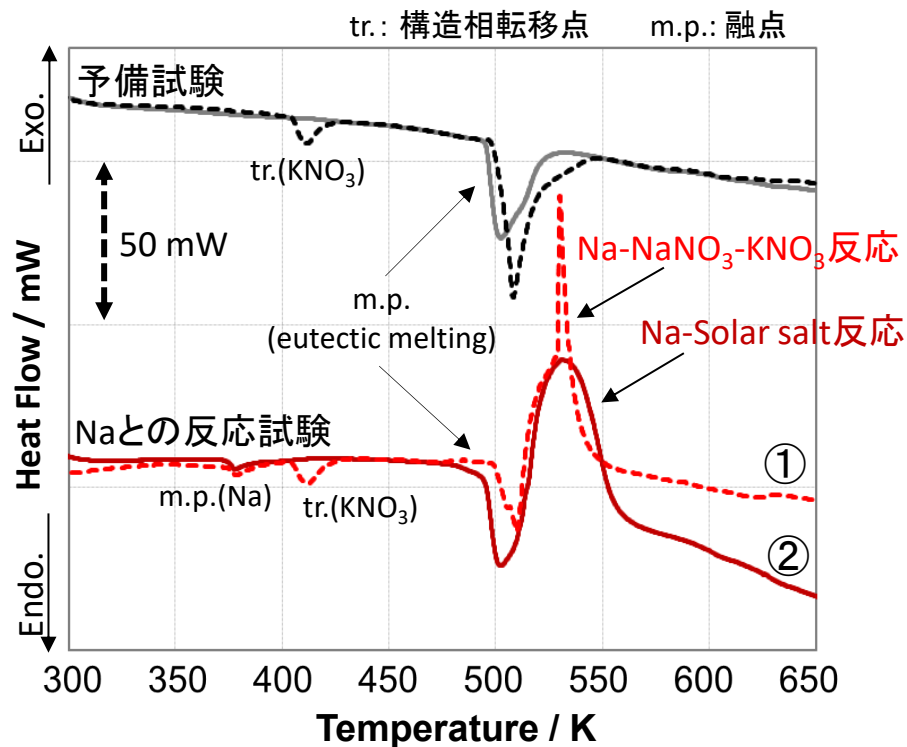
DSC曲線

Na(2 mg)-NaNO₃(30 mg)-KNO₃(20 mg) -----

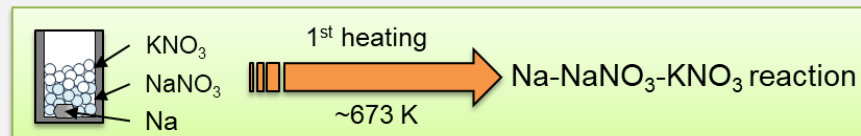
Na(2 mg)-Solar salt(50 mg) -----

昇温速度 : 5 K/min

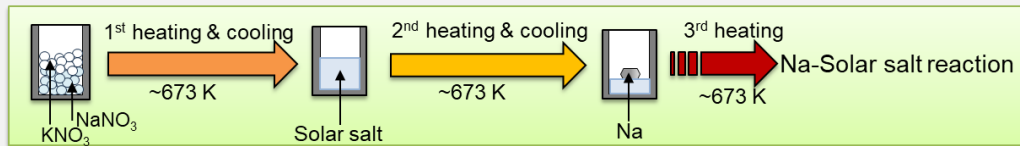
試験温度 : R.T. ~ 673 K



① Na、NaNO₃、KNO₃を一度に加熱



② 融解・凝固後のNaNO₃-KNO₃ (Solar salt) とNaを加熱

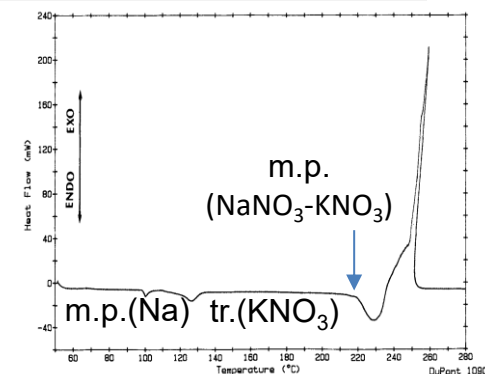


■ Naとの反応試験結果

① (赤破線) の場合、鋭い発熱ピーク

➡ 既往知見※の反応傾向と一致

※ D.A. Csejka, et al., J. Mater. Eng. 11 (1989) 291-297.



② (赤実線) の場合、緩やかな発熱ピーク

➡ 実際のNa-Solar salt反応

既往知見で報告されているNa-Solar salt反応はSolar saltの性状を反映していない状態での反応であり、Solar saltの性状を反映した状態でのNaとの反応においては、比較的緩やかな発熱ピークを示すことを確認した

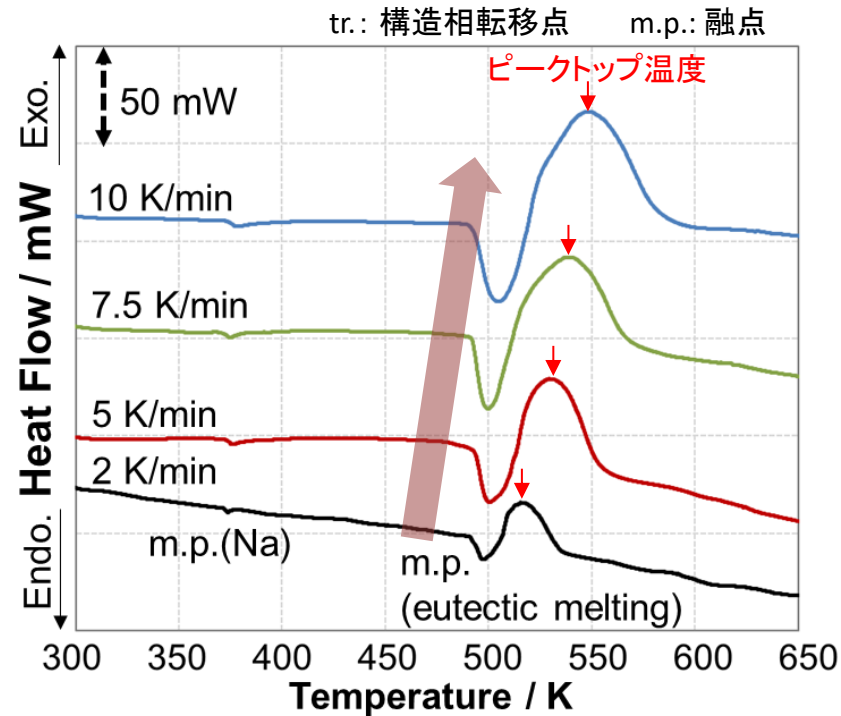
Na-Solar salt反応の速度論解析

DSC曲線

Na(2 mg)-Solar salt(50 mg)

昇温速度: 2, 5, 7.5, 10 K/min

試験温度: R.T. ~ 673 K



図から、昇温速度の増加に伴いピークトップ温度が高温に移行する速度論的傾向を確認



簡易的な速度論評価を実施

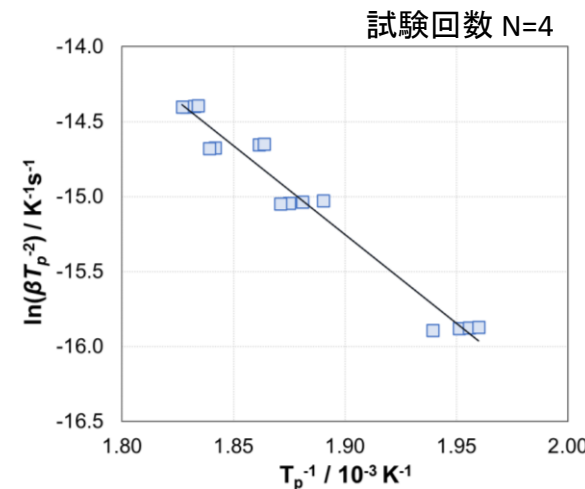
■ Kissinger法による反応速度論解析

昇温速度とピークトップ温度の関係から速度論的パラメータを決定

Kissingerの式

$$\ln \left(\frac{\beta}{T_p^2} \right) = -\frac{E_a}{RT_p} + \ln \left(\frac{AR}{E_a} \right)$$

E_a : 見かけの活性化エネルギー T_p : ピーク温度
 A : Arrheniusの頻度因子 β : 昇温速度



傾き $\Rightarrow -\frac{E_a}{R}$

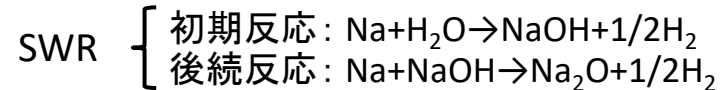
切片 $\Rightarrow \ln \frac{AR}{E_a}$

最小二乗法により算出した直線の傾きと切片から、速度論的パラメータ E_a 及び A を求めた

Na-Solar salt反応の速度論解析

■ 速度論的パラメータ

Na冷却式高速炉において、蒸気発生器の伝熱管破損時に生じるNa-水反応(SWR)と比較



	E_a / kJ mol ⁻¹	ln (A / s ⁻¹)
Na-Solar salt※ ¹	98.6 ± 15	16.7 ± 11
Na-H ₂ O(初期反応)	Extremely rapid	
Na-NaOH※ ² (後続反応)	161	23

※¹ 既往知見によれば、Na-Solar salt反応の発生ガスはN₂である。

※² Kikuchi S. et. al., Journal of Power and Energy Systems, 7(2) (2013) 79-93.

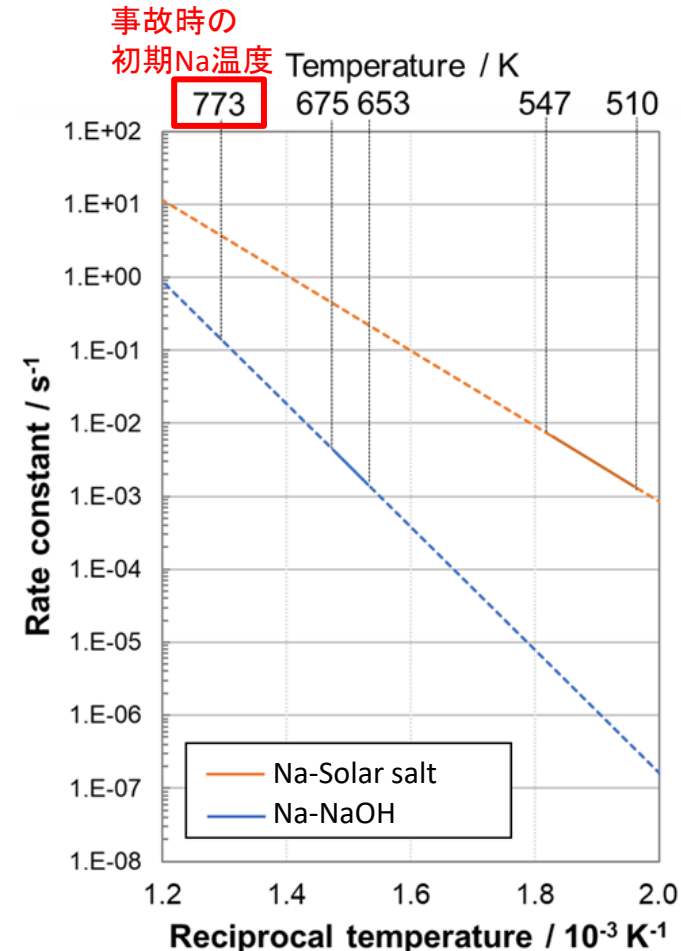
■ 773 Kにおける反応速度定数の比較

	Rate constant / s ⁻¹
Na-Solar salt	3.7×10^0
Na-NaOH(後続反応)	1.4×10^{-1}

Na-Solar salt反応速度は...

SWRの後続反応と同程度～やや速い

Na-熔融塩熱交換器伝熱管破損時の事象進展で勘案すべき時間スケール内にNa-Solar salt反応が生じ得る



反応速度定数の温度依存性
(Na-NaOH反応と比較)

硝酸塩データベース

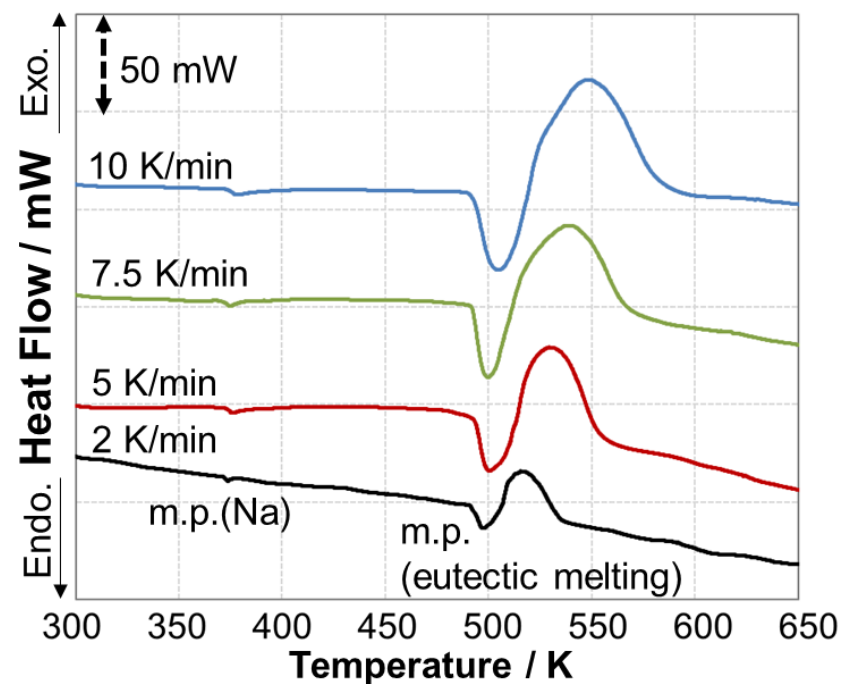
試験条件(各3回以上計測)
熱分析: 示差走査熱量測定(DSC)
サンプル容器: SUS304L
昇温速度: 2 K/min
試験温度: 298 K~673 K

- (1) C. W. Bale, *Calphad*, Vol. 33 (2009), pp.295-311.
- (2) A.G. Fernández, *Energy Procedia*, Vol. 49 (2014) , pp.607-616.
- (3) Bauer T., *Molten Salts Chemistry* (2013) pp.415-438.
- (4) Xiong Y., *Energy Procedia*, Vol. 158 (2019) , pp.5551-5556.
- (5) Delise T., , *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, Vol. 8 (2020), pp.111-120.

試薬	構造相転移 温度 (K) エンタルピー (J/g)		融点 温度 (K) エンタルピー (J/g)	
	実測値	文献値	実測値	文献値
NaNO ₃	$\frac{545.0 \pm 0.2}{12.0 \pm 0.9}$	$\frac{550.0^{(1)}}{20.58^{(2)}}$	$\frac{580.0 \pm 0.3}{161.2 \pm 3.2}$	$\frac{583.0^{(1)}}{178^{(3)}, 174.13^{(4)}}$
KNO ₃	$\frac{402.4 \pm 0.6}{50.0 \pm 1.7}$	$\frac{403.0^{(1)}}{46.35^{(2)}}$	$\frac{607.6 \pm 1.0}{91.9 \pm 4.2}$	$\frac{610.0^{(1)}}{100^{(5)}, 91.55^{(4)}}$
NaNO ₃ +KNO ₃	$\frac{402.9 \pm 1.2}{49.9 \pm 1.4}$	$\frac{403.0^{(1)}}{46.35^{(2)}}$	$\frac{502.2 \pm 1.6}{155.7 \pm 14.9}$	-
Solar salt	-	-	$\frac{493.1 \pm 2.0}{113.8 \pm 10.1}$	$\frac{491.5^{(4)}}{113^{(3)(4)}}$

Na-Solar salt反応データベース

試験条件(各4回計測)
 Na(2 mg)-Solar salt(50 mg)
 熱分析: 示差走査熱量測定(DSC)
 サンプル容器: SUS304L
 試験温度: 298 K~673 K (1073 Kまでの再現性確認済み)



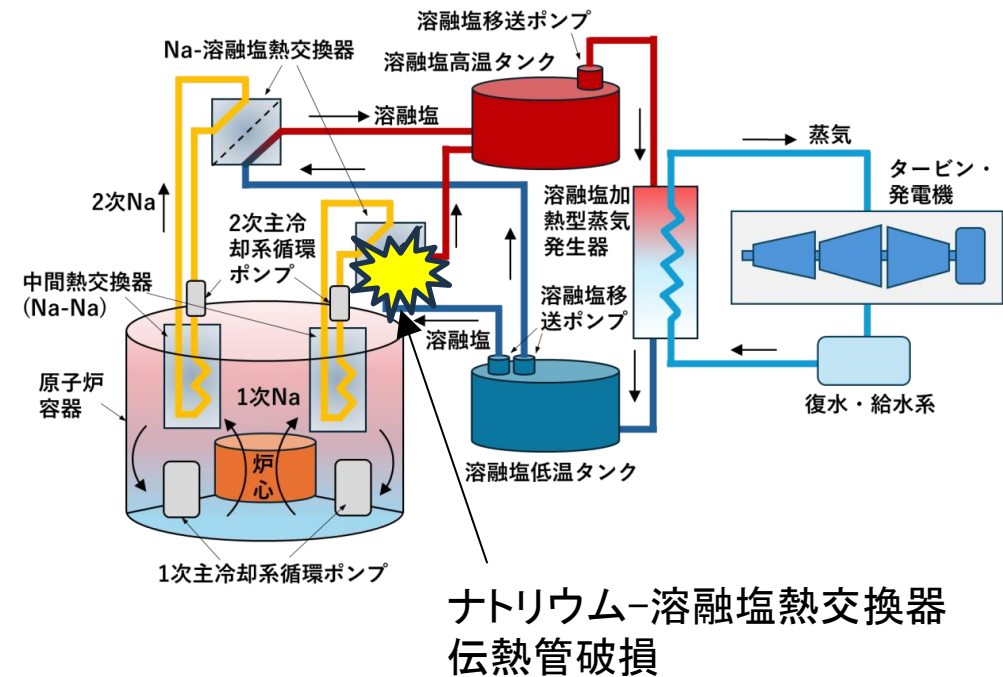
昇温速度 β (K/min)	反応ピーク温度 T_p (K)	反応エンタルピー $\Delta_r H$ (kJ/mol (Na))
2	512.5 ± 2.3	-191.7 ± 8.5
5	532.1 ± 2.4	-188.3 ± 3.4
7.5	540.1 ± 3.7	-194.8 ± 13.6
10	546.3 ± 1.0	-193.0 ± 8.9

反応速度論パラメータ	E_a / kJ mol ⁻¹	$\ln(A / s^{-1})$
Na-Solar salt	98.6 ± 15	16.7 ± 11

安全性向上方策の考案

- ナトリウム-溶融塩熱交換器における伝熱管破損
 - ナトリウムと溶融塩の接触：**発熱反応**^[7]
 - 熱交換器内の溶融塩出口側に温度計を設け、**溶融塩の急激な温度上昇として破損を検知**

- 伝熱管破損検出時の対応／設計方針：
 - 原子炉は速やかに停止し、崩壊熱除去系による**崩壊熱除去運転に移行**
 - 熱交換器内のナトリウム及び溶融塩を速やかにドレンし**反応を収束**
 - ドレン後の流体を**安定冷却**できるよう設計し、**温度上昇による破損拡大を防止**
 - ナトリウム-溶融塩反応に伴うガス発生量を評価し、ナトリウム-溶融塩反応に伴う**圧力上昇による破損拡大防止を考慮して設計**



[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(6) ナトリウム-溶融塩の化学反応に係る基礎試験”, 日本原子力学会2023年春の年会 (2024)

- 独創性
 - これまでナトリウムと硝酸塩を用いた熱交換器は存在しておらず、その熱交換器設計のための熱交換性能評価技術とバウンダリ破損時の化学反応特性に着目している研究はなく、独創性を有する。
 - 伝熱性能向上方策や化学反応対策までを考慮しており、革新的な技術のブレークスルーに期待できる。
- 成果の展開
 - 産業界へ幅広くフィードバック
 - 日立GEベルノバニュークリアエナジー（株）が連携機関
 - 本研究成果は日米協力に貢献できる可能性あり
- 波及効果
 - 本研究で得られた成果はナトリウムと硝酸塩を用いた熱交換器設計に役立ち、本研究テーマの蓄熱式高速炉の開発に大きく貢献する。
 - ナトリウムと硝酸塩の化学反応特性は新規のデータであり、学術的な波及効果が期待できる。
- 外部発表
 - 学術論文 Nuclear Engineering and Design (2026) 1件 審査中
 - 学術論文 Progress in Nuclear Science and Technology (2025/11) 3件 公開済
 - E-book New Energy and Future Energy Systems (2023/11) 1件 公開済
 - 国際会議 ICONE32 (2025/6) 1件 招待講演
 - 国際会議 GLOBAL2024 (2024/10) 3件、NRER (2024/10) 1件、NEFES2023 (2023/11) 1件
 - 原子力学会口頭発表 2025春(2025/3) 3件、2024春(2024/3) 3件、2023春(2023/3) 3件、
 - 機械学会口頭発表 動エネシンポ(2024/6) 3件、動エネシンポ(2023/9) 1件
 - その他口頭発表 熱測定討論会(2024/9) 1件、熱測定討論会(2025/9) 1件