

- 日本原子力学会 2021年秋の大会、オンライン、2021/9/8-10

**日本原子力学会
新型炉部会セッション
原子カイノベーションを支える最新の新型炉開発の状況**

**(3) 安全性・信頼性を高めた
小型ナトリウム冷却高速炉**

2021年9月10日

三菱重工業（株）
坂場 弘

1. 開発目標・コンセプト

- 21世紀中の軽水炉／高速炉共存から、将来の実用炉への発展・実証を見据え、**多様な高速炉ニーズに対応**できるナトリウム冷却高速炉(MCR)
- **高速炉技術として最も成熟したナトリウム冷却炉 (SFR)** をベースに、**国産技術に立脚した高い安全性・信頼性**の実現
- **従来小型炉より高い受動的安全特性及びナトリウム安全特性**を有するとともに、将来の社会ニーズに合わせ**大型化への展開 (出力変更) も容易**なプラント概念

○ 主な具体的開発方針

- 金属燃料炉心の採用により異常時炉停止失敗事象 (ATWS) 時にも負の反応度効果を促進
- ナノ流体の採用によりナトリウムの化学的活性度を抑制
- 実証性の高いナトリウム冷却高速炉技術を採用 (小型から大型の出力増大へ対応可能な崩壊熱除去系型式を採用)



〔MCR200プラント鳥観図〕

MCR200 (200MWe級) 主要目

炉型	小型ナトリウム冷却高速炉 (タンク型)
冷却材	ナトリウム (2次系にナノ流体採用)
熱出力	500 MWt
電気出力	200 MWe
燃料	粒子型金属燃料
プラント寿命	(設計) 60年

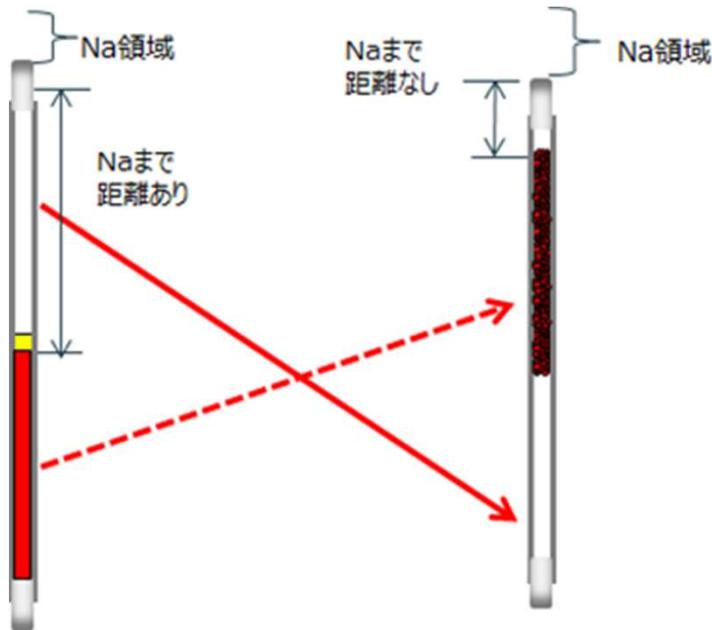
○ターゲット市場

国内・軽水炉プルサーマルサイクル (プルサーマルによるマルチリサイクル)

2. 採用技術と特徴 (1/2)

革新的な金属燃料

- 従来の金属燃料と比較して**安全性の高い革新的な粒子型金属燃料炉心**（ナトリウムが燃料直上に存在し異常時の中性子漏えいを促進）を採用
- 受動的炉停止機能を強化**（燃料膨張等も考慮し**大型化しても安全機能を維持**）
- 燃料ピン内にNaが存在せず、燃料製造、再処理プロセスの合理化も期待

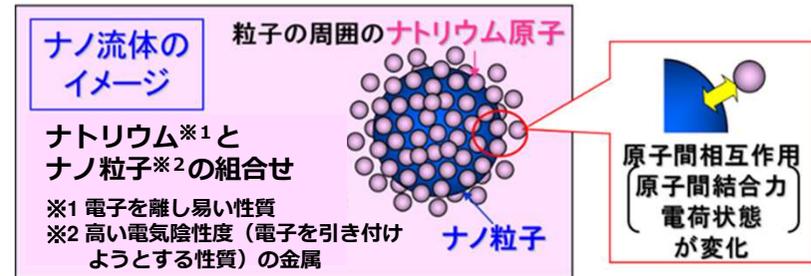


〔従来型と粒子型金属燃料の比較〕

電中研殿との共同開発

ナノ流体によるナトリウム安全性・信頼性向上

- 2次系Naに**ナノ流体**（冷却材ナトリウム中に金属ナノ粒子を分散）を採用
- ナトリウムの**化学的活性を抑制**、漏えいNa燃烧、Na-水反応、Na-コンクリート反応の影響緩和
 - ▶▶▶ **ナトリウム安全性・信頼性の向上**
事故対策設備の合理化

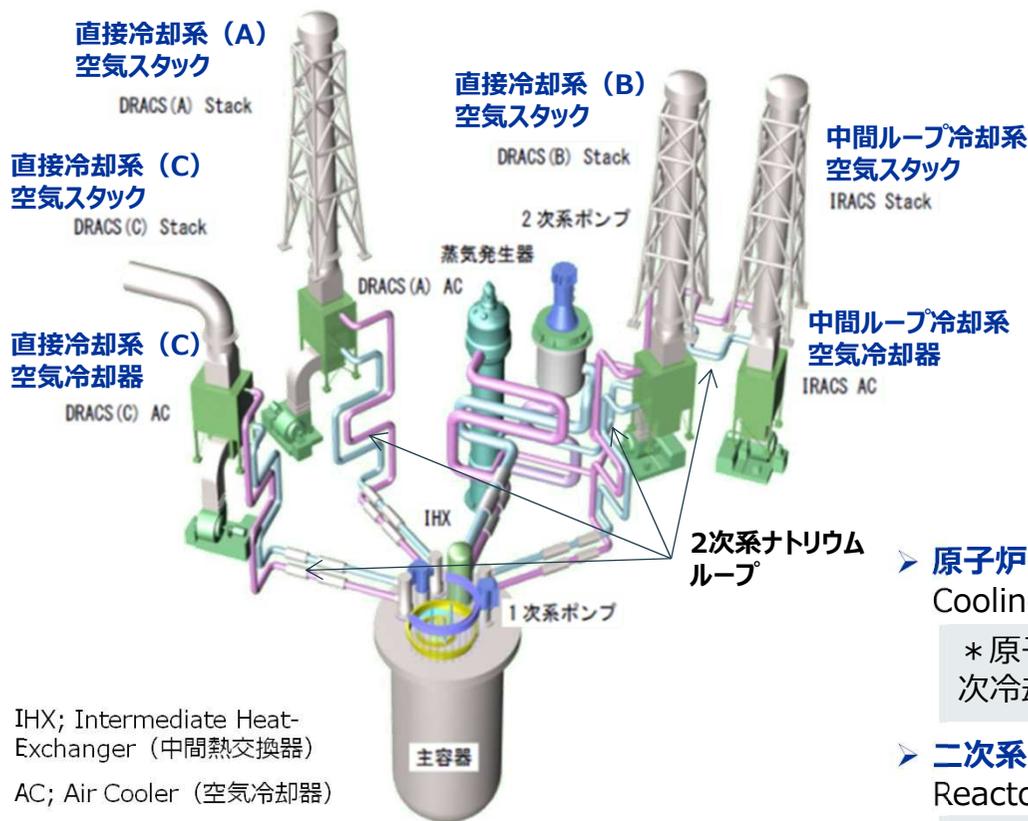


JAEA殿との共同開発

2. 採用技術と特徴 (2/2)

実証性の高いナトリウム冷却高速炉技術

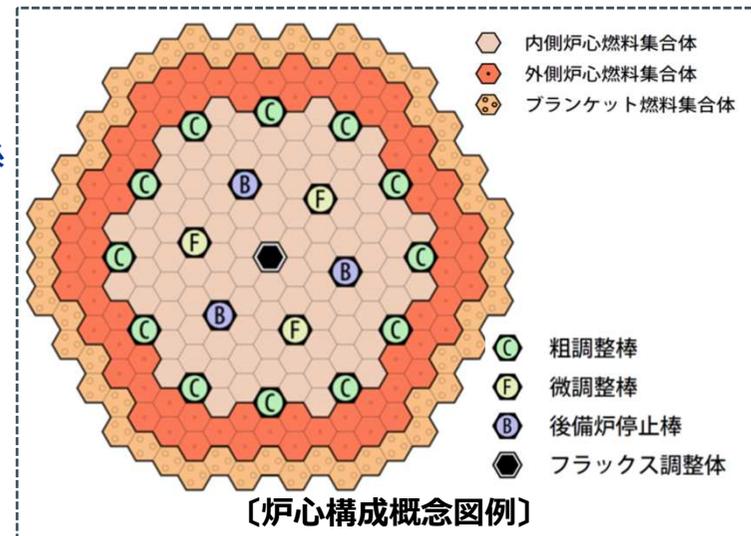
- 常陽、もんじゅの実績をベースにした**大型化も可能な崩壊熱除去系統** (DRACS、IRACS)
- 従来SFRと同様の2領域均質ベース炉心、独立2系統 (主・後備) の原子炉停止系



IHX; Intermediate Heat-Exchanger (中間熱交換器)

AC; Air Cooler (空気冷却器)

〔崩壊熱除去系統構成図 (多重化・多様化) 〕



〔炉心構成概念図例〕

➤ **原子炉直接冷却系 DRACS** (Direct Reactor Auxiliary Cooling System) ;

* 原子炉容器内に熱交換器を直接挿入し、原子炉内の1次冷却材を直接冷却して炉心を冷却する方式

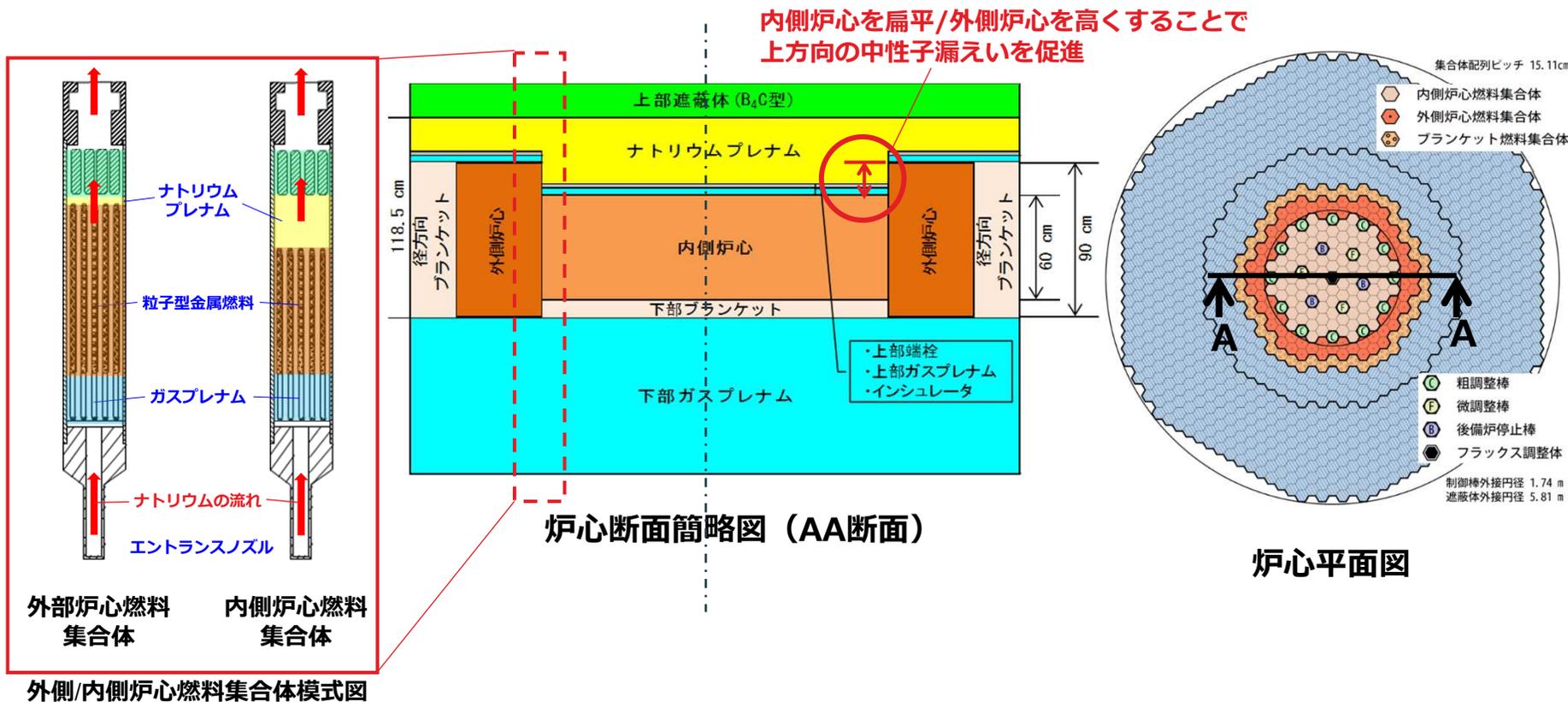
➤ **二次系 (中間ループ) 冷却系 IRACS** (Intermediate-loop Reactor Auxiliary Cooling System) ;

* 2次系主冷却ループ (蒸気発生器) をバイパスして熱交換器を設置し、2次冷却材を冷却することによって炉心を冷却する方式 (もんじゅで採用)

3. MCR200の開発状況の紹介

- ・ 炉心概念の構築
- ・ 受動的な安全特性の概略評価
- ・ プラント概念の構築

炉心概念構築 (1/3) MCR200の炉心概念 (H型炉心)



H型炉心概念の構築

内側炉心を扁平、外側炉心の高さを高くすることで異常時の中性子漏えいを促進し、高速炉の核的リスクである正のナトリウムボイド反応度※を零近傍まで低減できる炉心概念(H型炉心)を構築。

※冷却材沸騰時に炉心出力が増大する

➡ 炉心性能要求(燃焼度、増殖比等)を満足しつつ、異常時の過渡挙動を緩和(安全性の向上)

炉心概念の構築 (2/3)

◆ 安全評価上の指標

Naボイド反応度： MAを多く含む燃料を想定しても1\$以下(H型炉心採用)

制御棒誤引抜反応度： 制御棒誤引抜反応度を出来る限り低減

(制御棒割合を開発中のFBR実証炉 (MOX燃料) と同程度まで増加)

項目		MCR200
炉心出力 (MWe)		200
1次系冷却材出入口温度 (°C)		360 / 500
集合体数	炉心燃料集合体 (内側 / 外側炉心)	162 (90/72)
	ブランケット燃料集合体	54
	制御棒 (制御棒割合)	18 (11%)
炉心等価直径 (m)		2.13
Naボイド反応度		0~1 \$
制御棒誤引抜反応度		48 ¢
平均出力密度 (W/cm ³)		200
平均線出力 (W/cm)		230

◆性能目標（運転サイクル長さ、増殖比、取出平均燃焼度）の達成

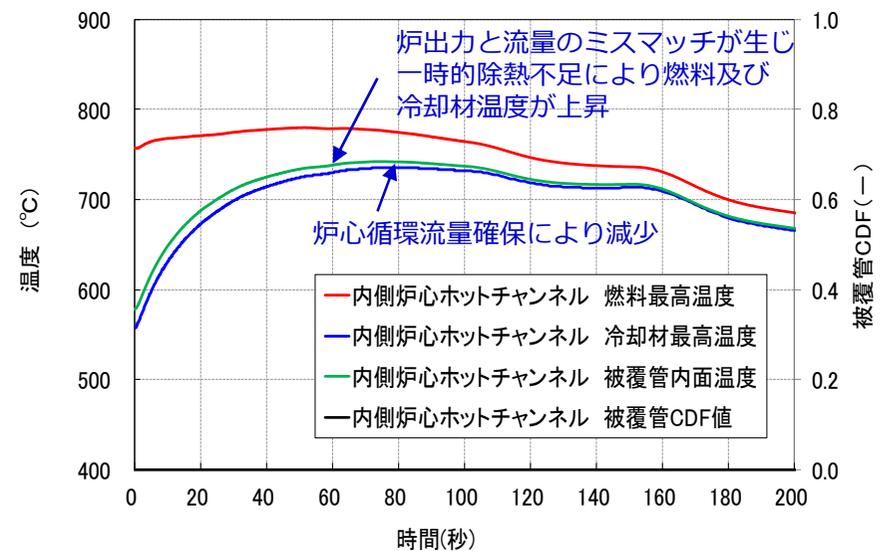
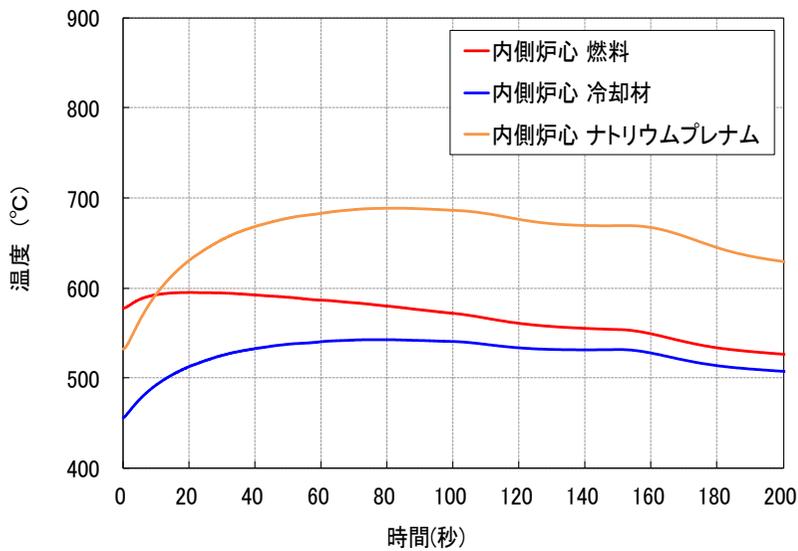
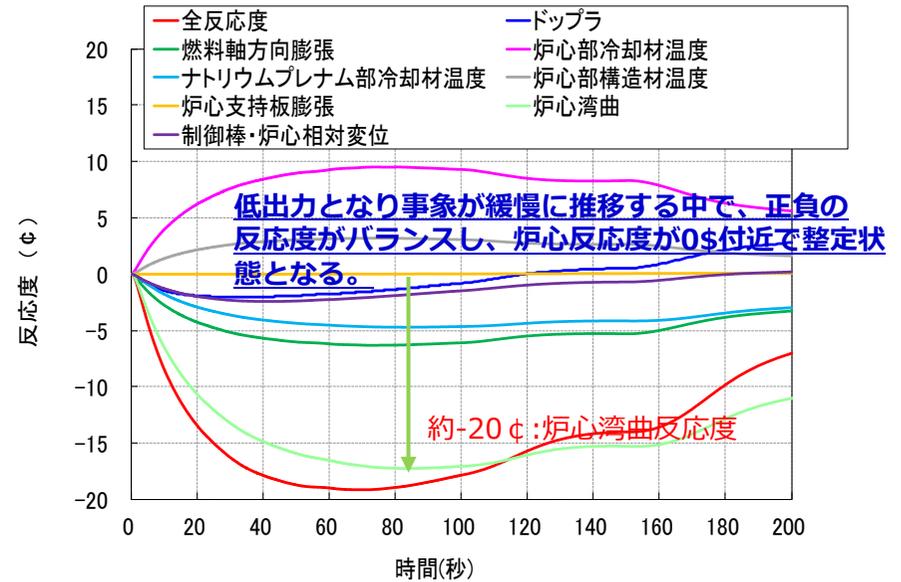
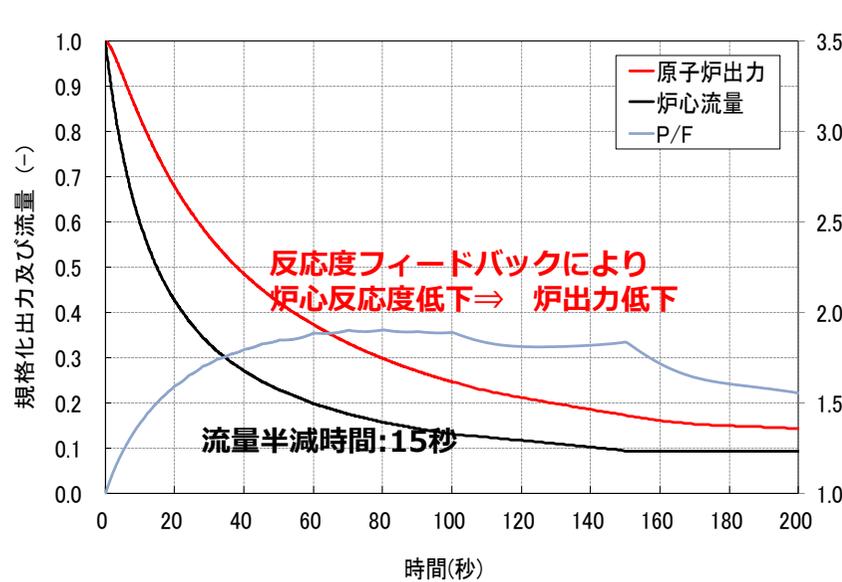
✓運転サイクル長さ、燃焼度確保のため太径ピン(φ9.5 mm)を採用

✓増殖比確保のためMCR200ではブランケット燃料集合体を装荷 等

なお、炉心大型化(MCR1000)に際しては、燃料ピン細径化と多数ピンバンドル化により、線出力を維持しつつ出力密度を増大（コンパクト化）の予定

項目	単位	MCR200
運転サイクル長さ	か月	13
増殖比	—	1.06～1.13
取出平均燃焼度	GWd/t	炉心部 87
全炉心		61
最大高速中性子照射量	$10^{23}\text{n}/\text{cm}^2$	4.4
最大線出力	W/cm	約380
燃焼欠損反応度	$\% \Delta k/kk'$ (ϕ)	1.26 (340)

受動的安全特性の概略評価 (1/2)



流量減少時緊急炉停止失敗事象(ULOF)の見通し

- 出力流量比 (P/F) が 1 から 2 に増加する間に炉心湾曲による -20¢ 程度の負の反応度が挿入できれば、受動的炉停止が成立する見通しである。

正の反応度挿入時緊急炉停止失敗事象(UTOP)の見通し

- 制御棒誤引き抜き反応度を制限(ロッドストップ等の採用) した上で、炉心湾曲による負の反応度挿入を考慮することにより受動的炉停止が成立する見通しである。

除熱失敗時緊急炉停止失敗事象(ULOHS)の見通し

- 受動的炉停止は成立する見通しである。
- 制御棒・炉心相対変位反応度、炉心湾曲反応度は必ずしも負とはならず、事象を厳しくする効果がある。

出力アップコンセプトの種類

コンセプト	概要
冷却系機器開発コスト抑制型	冷却系機器設備容量を変えないで冷却系ループ数を増加させることで出力を増加させる。冷却系機器大型化に伴う開発コストを低減できる。
機器大型化型	冷却系ループ数を変えないで冷却系機器の大型化により出力を増加させる。スケールメリットが認められるので、経済性を高めることができる。
モジュラー型	定出力のプラントをモジュールとし、それを増やすことで出力を増加させる。



MCRにおける出力アップの方針：冷却系機器開発コスト抑制型を採用
⇒出力アップに冷却系ループ数増加で対応することで冷却系機器大型化に伴う開発コストを抑制する。

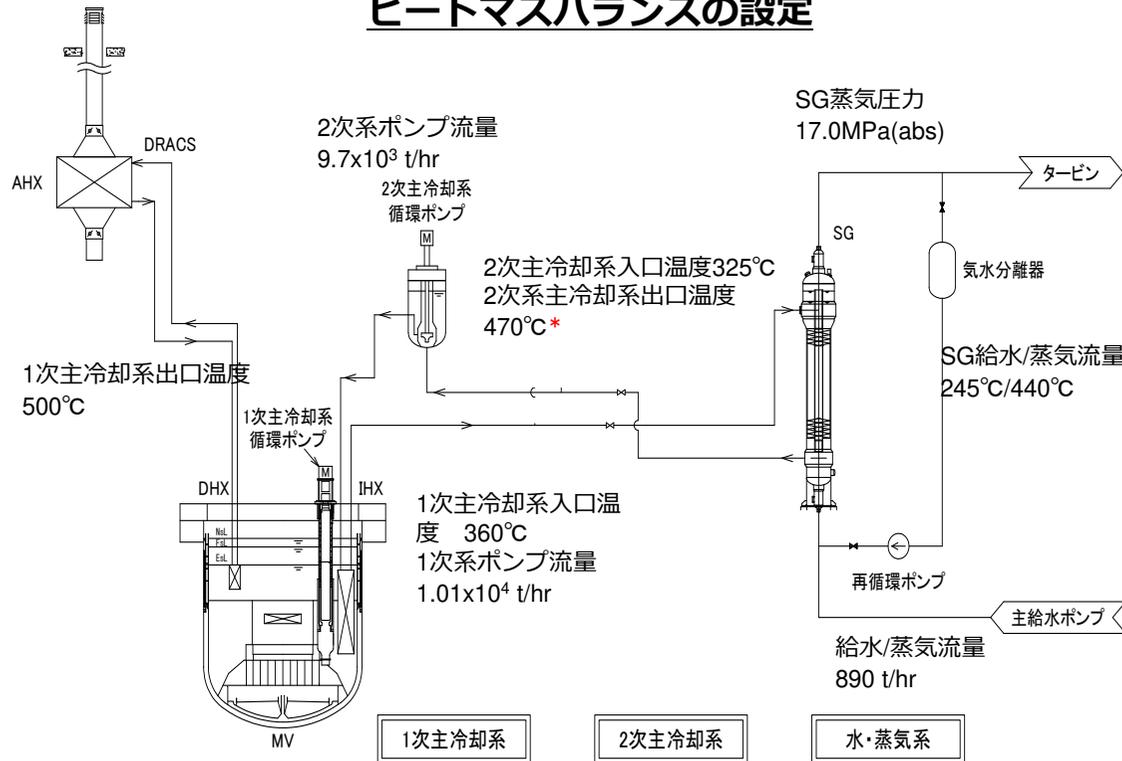
出力200MWe級の小型炉(MCR200)の方針

冷却系機器に対してスケールメリットを適用し**経済性が向上**するように冷却系ループ数を極力少なく(冷却系機器容量を極力大きく)する。

プラント概念の構築(2/4) プラント概念の具体化と合理化 三菱重工

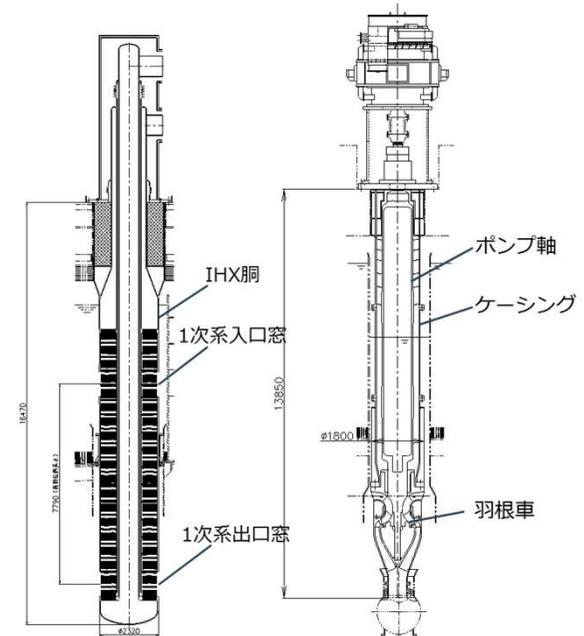
200MWe級小型(MCR200)のヒートマスバランスを検討。系統仕様を最適化し、主容器内の熱交換器(IHX)の伝熱面積を小型化。また、ヒートマスバランスをもとに主要機器構造概念を具体化。 ➔ **主容器の小型化が可能(経済性の更なる向上)**

ヒートマスバランスの設定



*** IHX伝面を小さくする温度設定**

主要機器構造概念の具体化



熱交換器(IHX) 1次主冷却系ポンプ

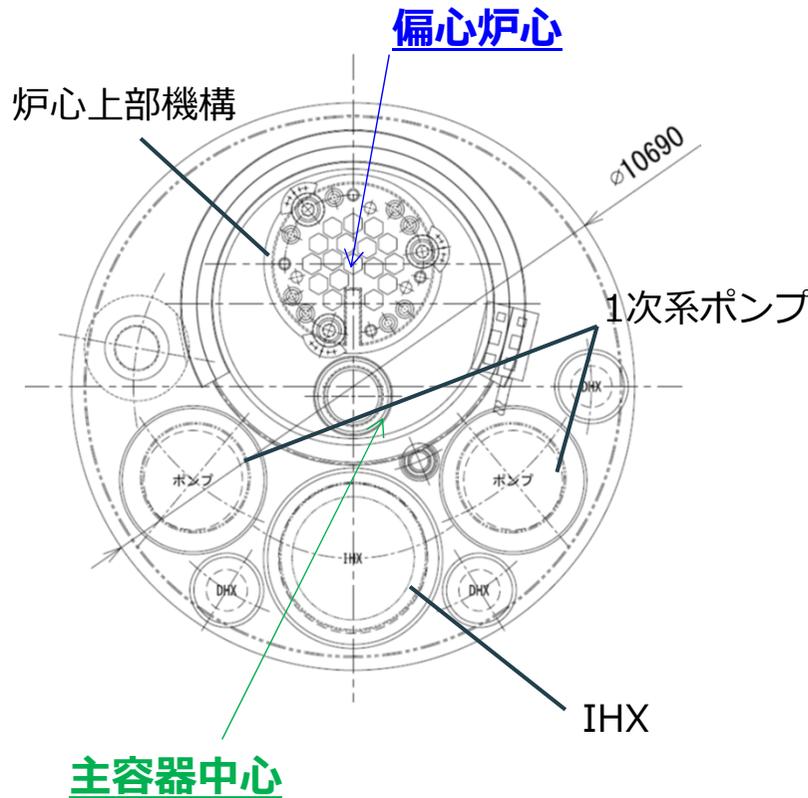
系統仕様

■ IHX : 1基、 ■ DHX : 3基、 ■ 1次主冷却系ポンプ : 2基、 ■ 出力 : 500MWt

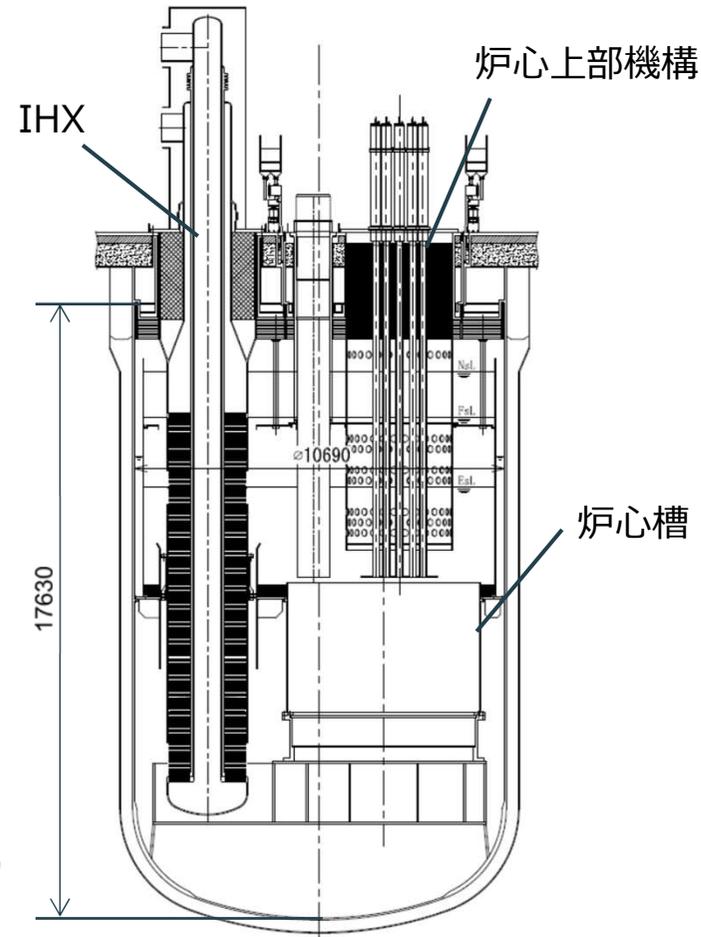
パラメータ

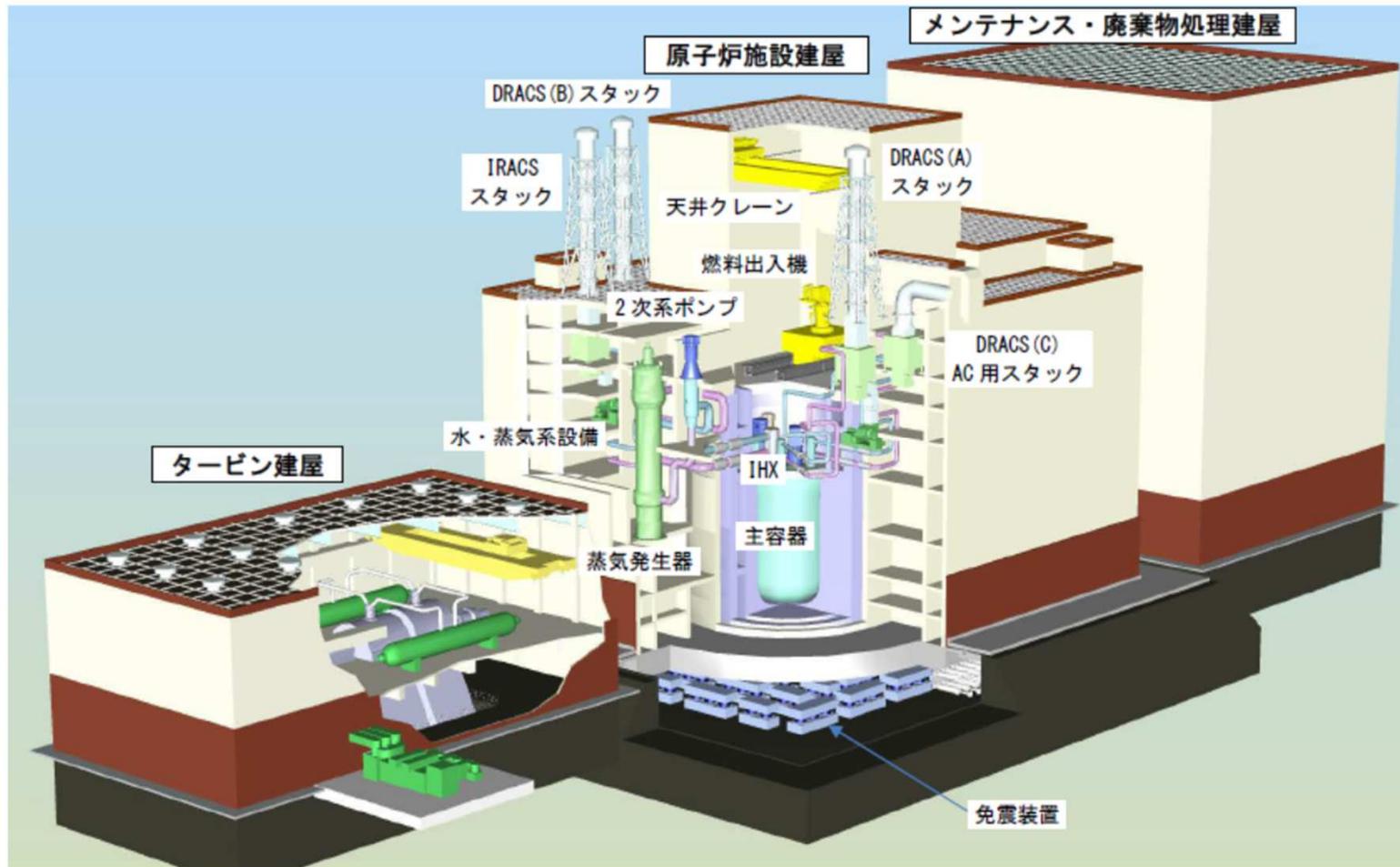
① 1次系入口温度、 ② 2次系出入口温度、 ③ タービン蒸気圧力、 ④ 1, 2次系冷却材流量

200MWe級小型炉(MCR200)の主容器の構造概念を検討。**炉心を偏心**させることで炉内機器配置の自由度が拡大し、最適な配置設計により**主容器サイズ(主容器径)**を合理化。



出力アップ時は同一構成の冷却系統 (IHX等)を増設





MCRとして安全性と機能性を備え、合理的な建屋配置概念を構築

- 高い安全性、信頼性を確保しつつ、社会的要請に応じて柔軟に出力アップが可能なナトリウム冷却高速炉（出力200MWe級）のプラント基本概念を構築した。
- 本プラント概念構築により、従来小型炉より高い受動的な安全特性及びナトリウム安全特性を有するとともに、将来の社会ニーズに合わせ大型化への展開（同一冷却システムを増やすことによる出力増加）等が可能なものとした。
- 今後、同一の冷却システムを増設することにより社会的要請に応じて出力アップすることを想定したプラントの基本概念を構築していく予定である。

MOVE THE WORLD FORWARD

**MITSUBISHI
HEAVY
INDUSTRIES
GROUP**