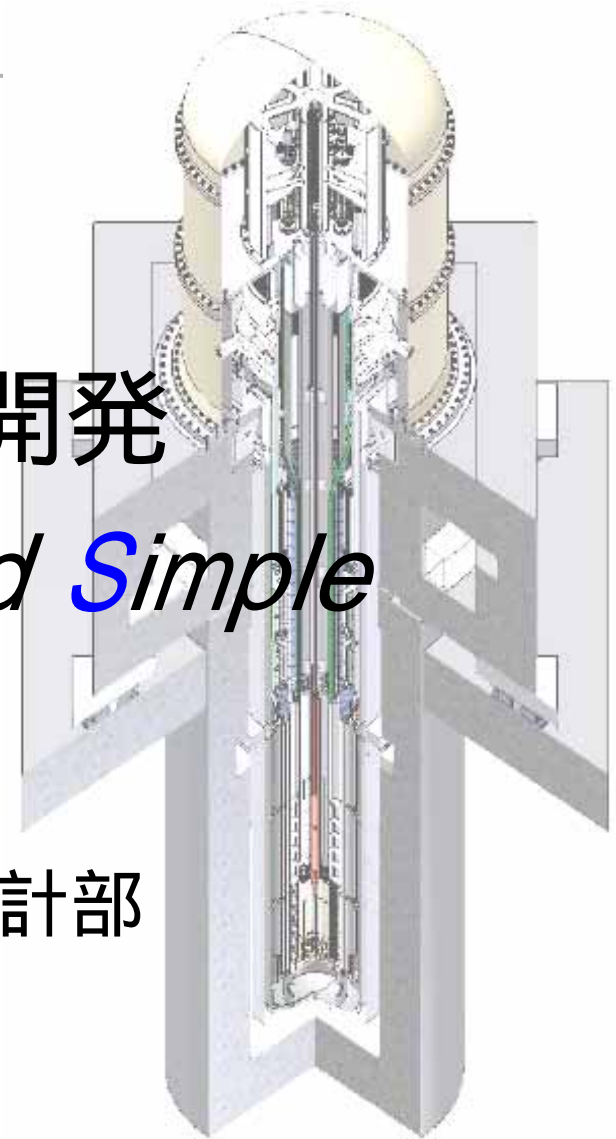


TOSHIBA

Leading Innovation >>>

次世代原子炉 小型高速炉 4 S の開発 *Super - Safe, Small and Simple*

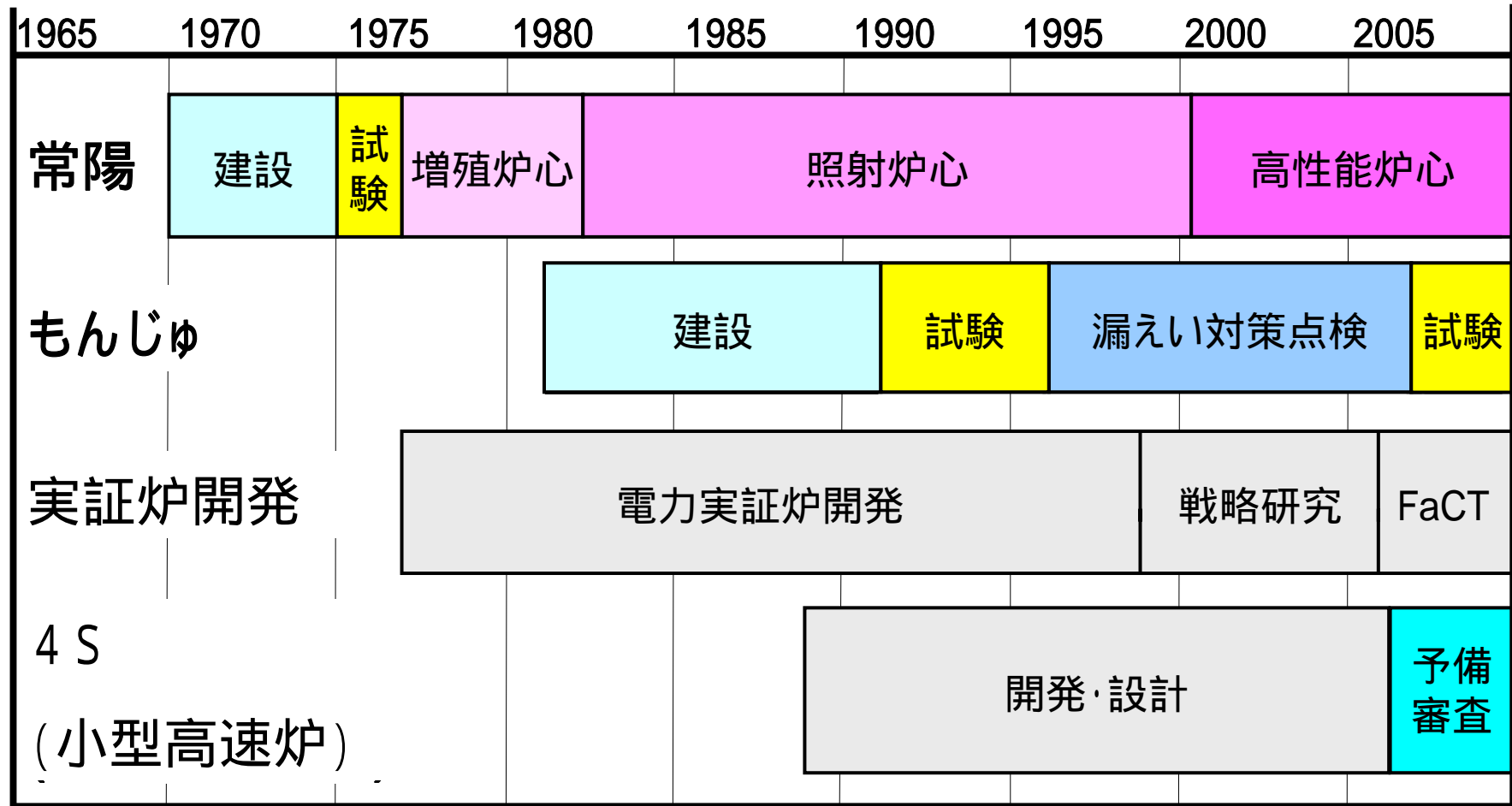
2010年9月10日
(株)東芝 原子力開発設計部
大田裕之



目次

- これまでの経緯
- 小型高速炉4S
- 安全性
- 小型炉の市場
- 革新技术開発
- 米国許認可申請

東芝の高速炉開発



国・電力殿の開発PJに参画し技術力を向上

はじまり

IAEA砂漠緑化プロジェクト



- 1988年検討開始
- 電力中央研究所殿と協力して実施
- IAEAプロジェクトに採択
(小型原子炉による淡水製造で砂漠緑化)
- 50MWe プラント

目次

- これまでの経緯
- 小型高速炉4S**
- 安全性
- 小型炉の市場
- 革新技術開発
- 米国許認可申請**

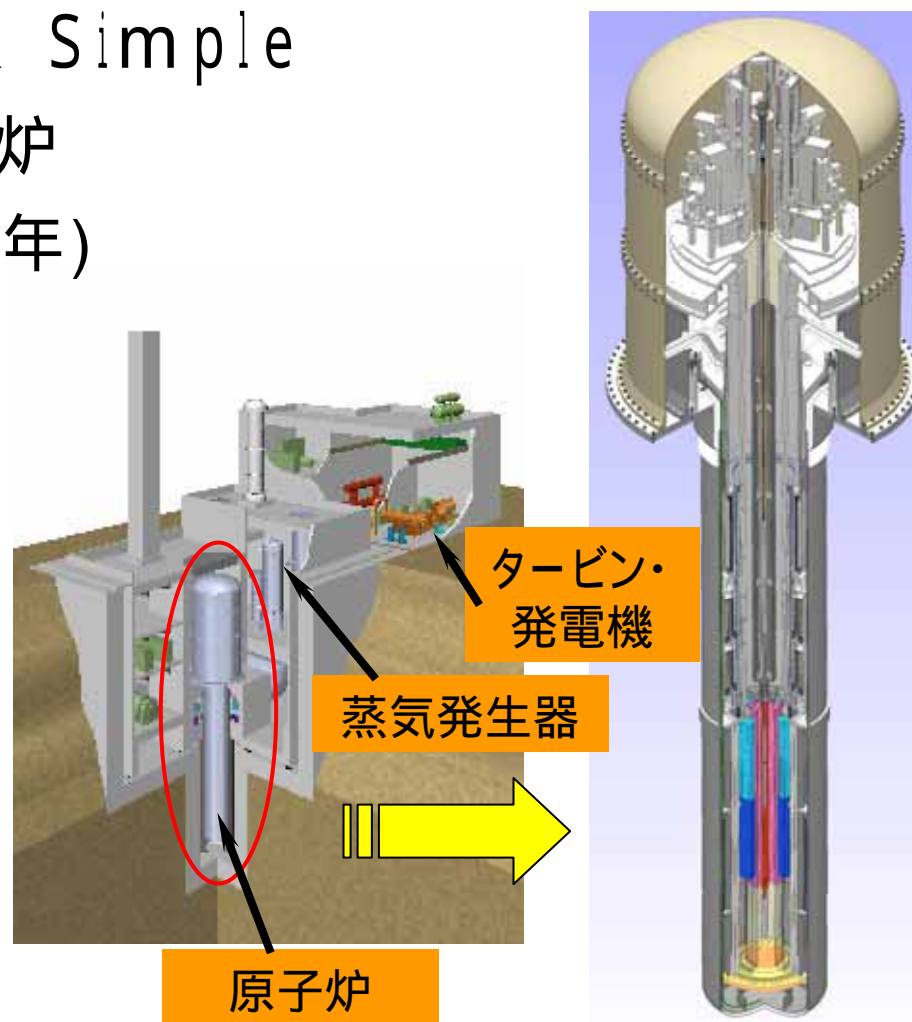
小型高速炉(4S)

4S: Super Safe, Small & Simple

遠隔地向け小型ナトリウム高速炉

出力 10MWe(30年) / 50MWe(10年)

- 長期燃料無交換
- 炉停止操作失敗でも安全に停止
- 静的機器によるメンテナンス量低減
- 地下設置によるセキュリティ向上
- 実証済み機器を多用、革新機器を投入した経済性、安全性、信頼性向上

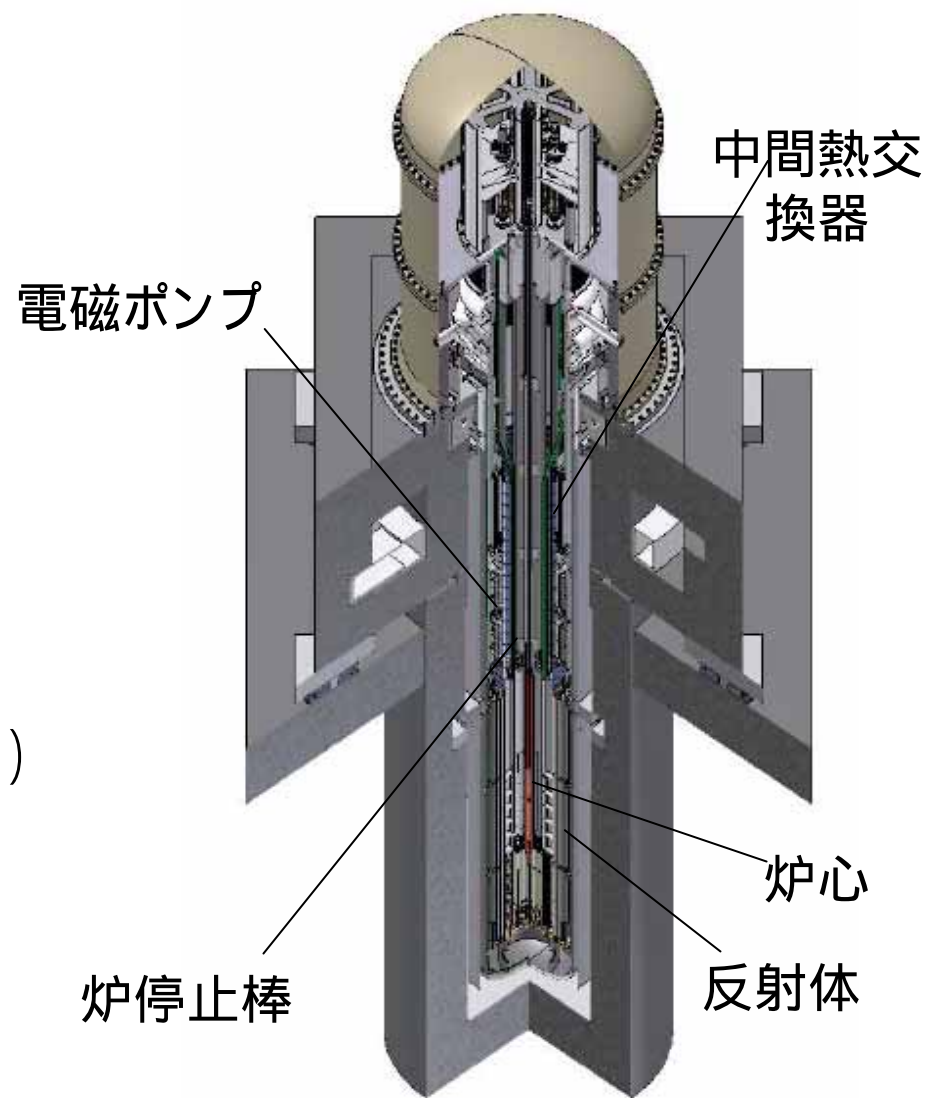


4Sは電力中央研究所殿との協力により開発しています。

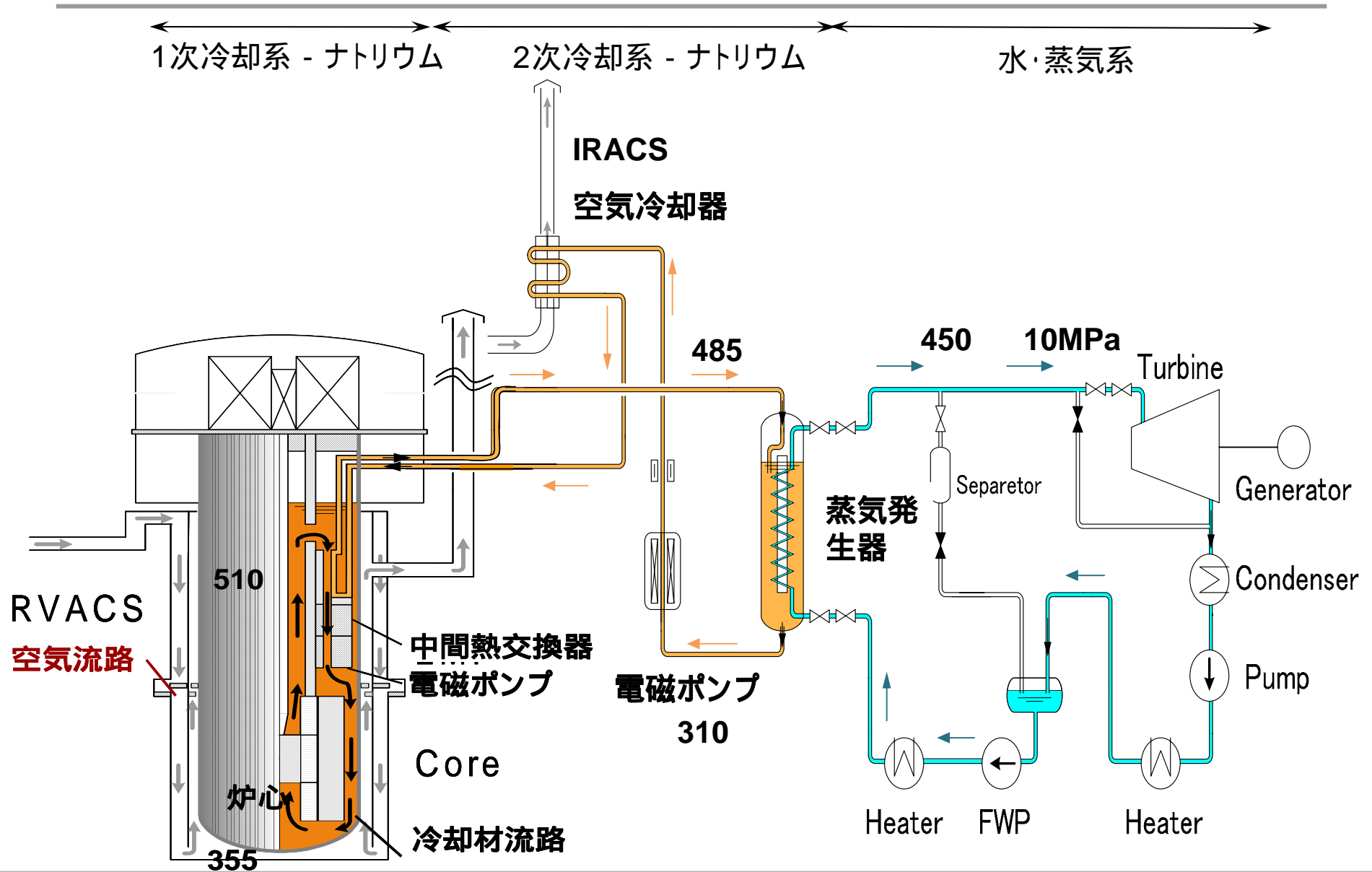
4Sによる遠隔地エネルギー供給の事業化を推進

原子炉

- 炉心・燃料
 - 金属燃料 (U-10%Zr)
- 反応度制御
 - 反射体
- 炉停止系
 - 炉停止棒(1体)と反射体
- 一次冷却系、主要機器
 - ・プール型
 - ・浸漬型電磁ポンプ(2基直列)

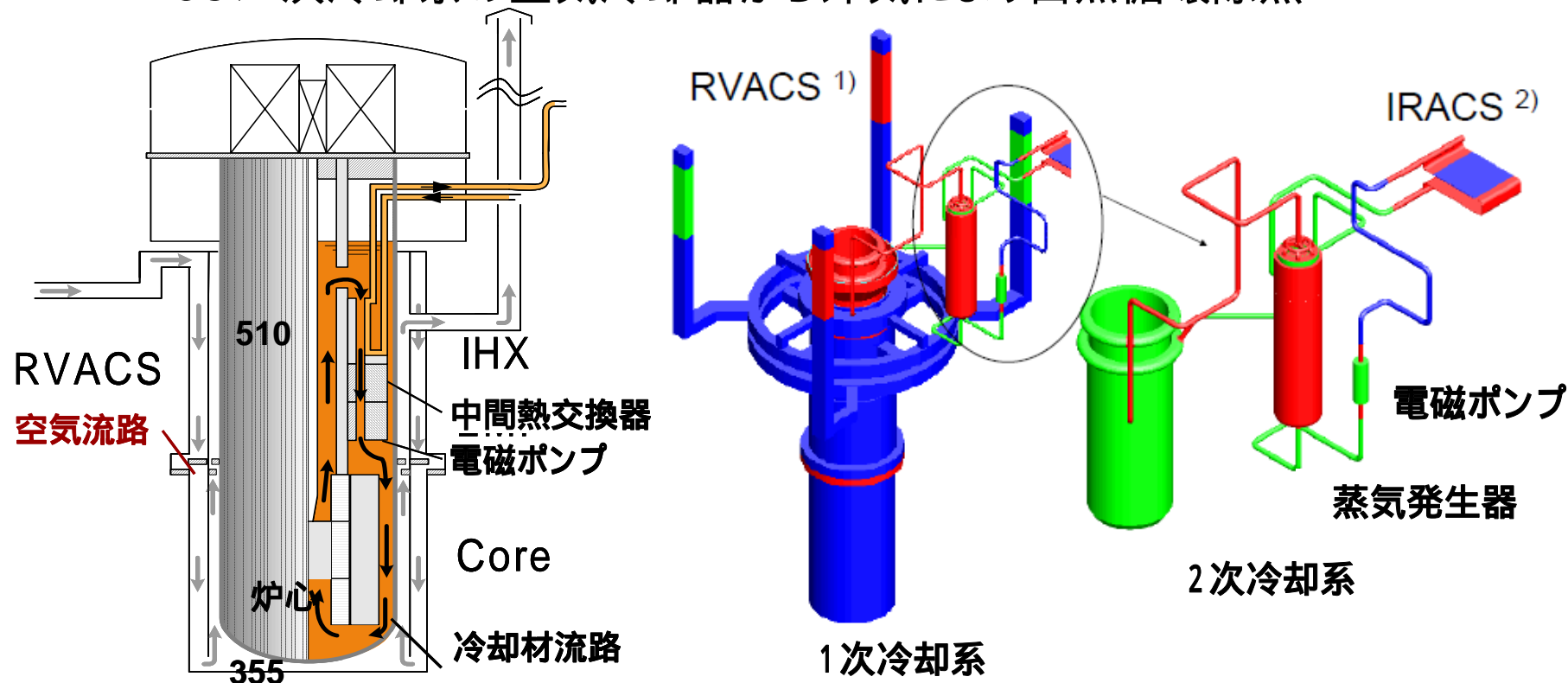


熱輸送系



非常用冷却系

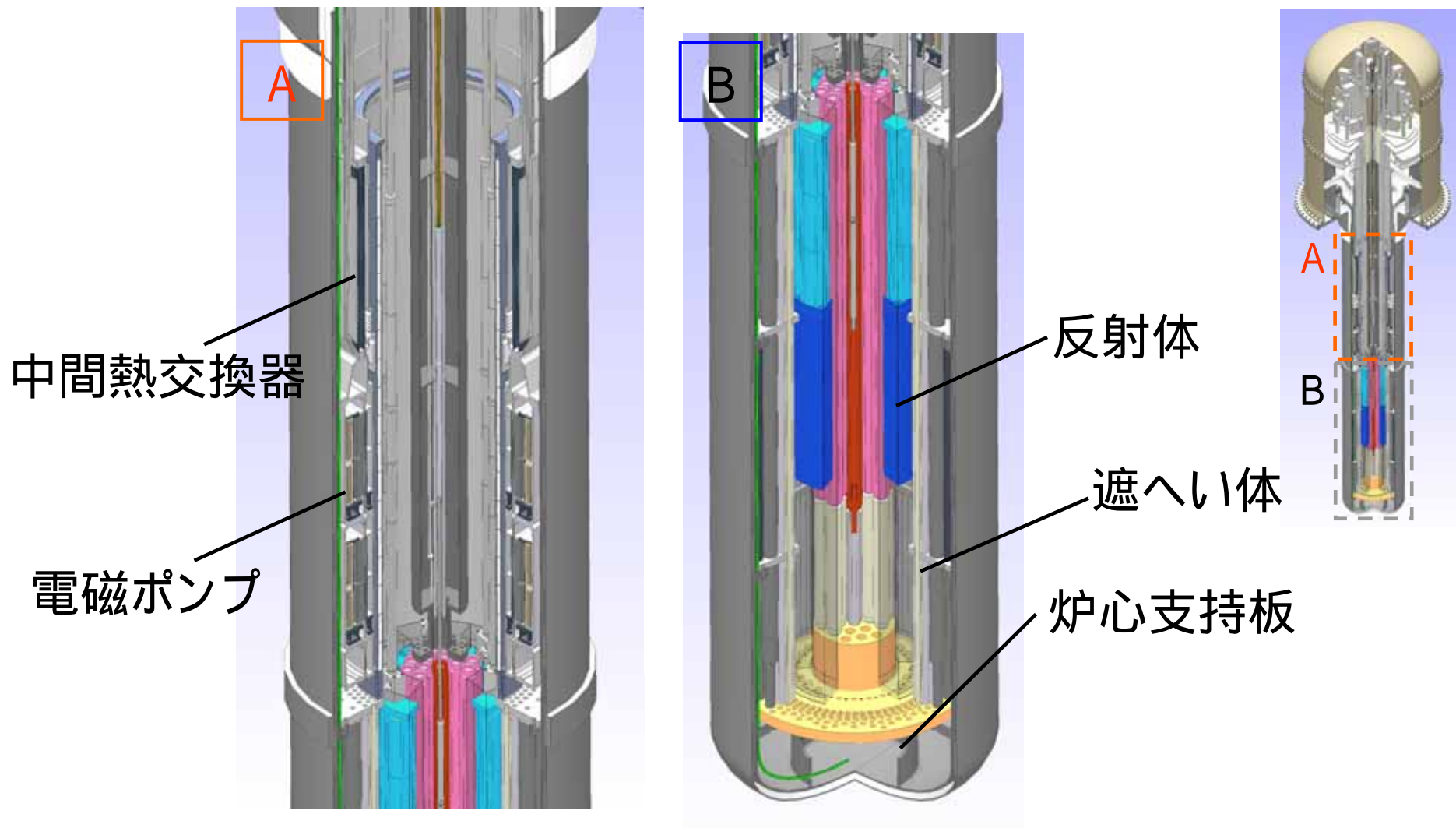
- 自然循環を用いた2種類の残留熱除去系
 - RVACS: ガードベッセル外側から外気により自然循環除熱
 - IRACS: 2次冷却系の空気冷却器から外気により自然循環除熱



異常時に炉停止が全て失敗し、かつ、1つの非常用冷却系が動作しなくても安全に炉停止

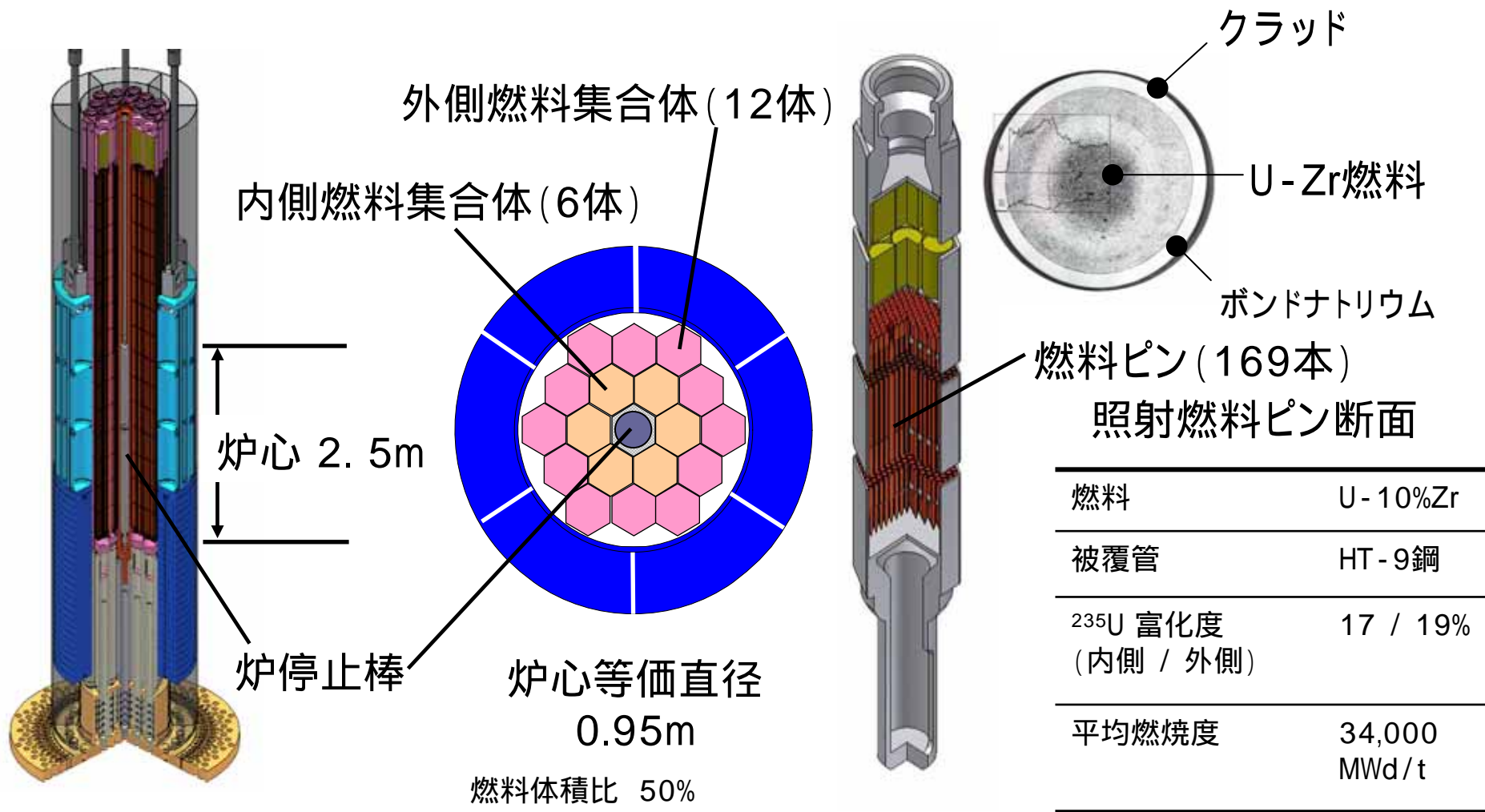
原子炉内部構造

原子炉内の一次系機器を環状に配置



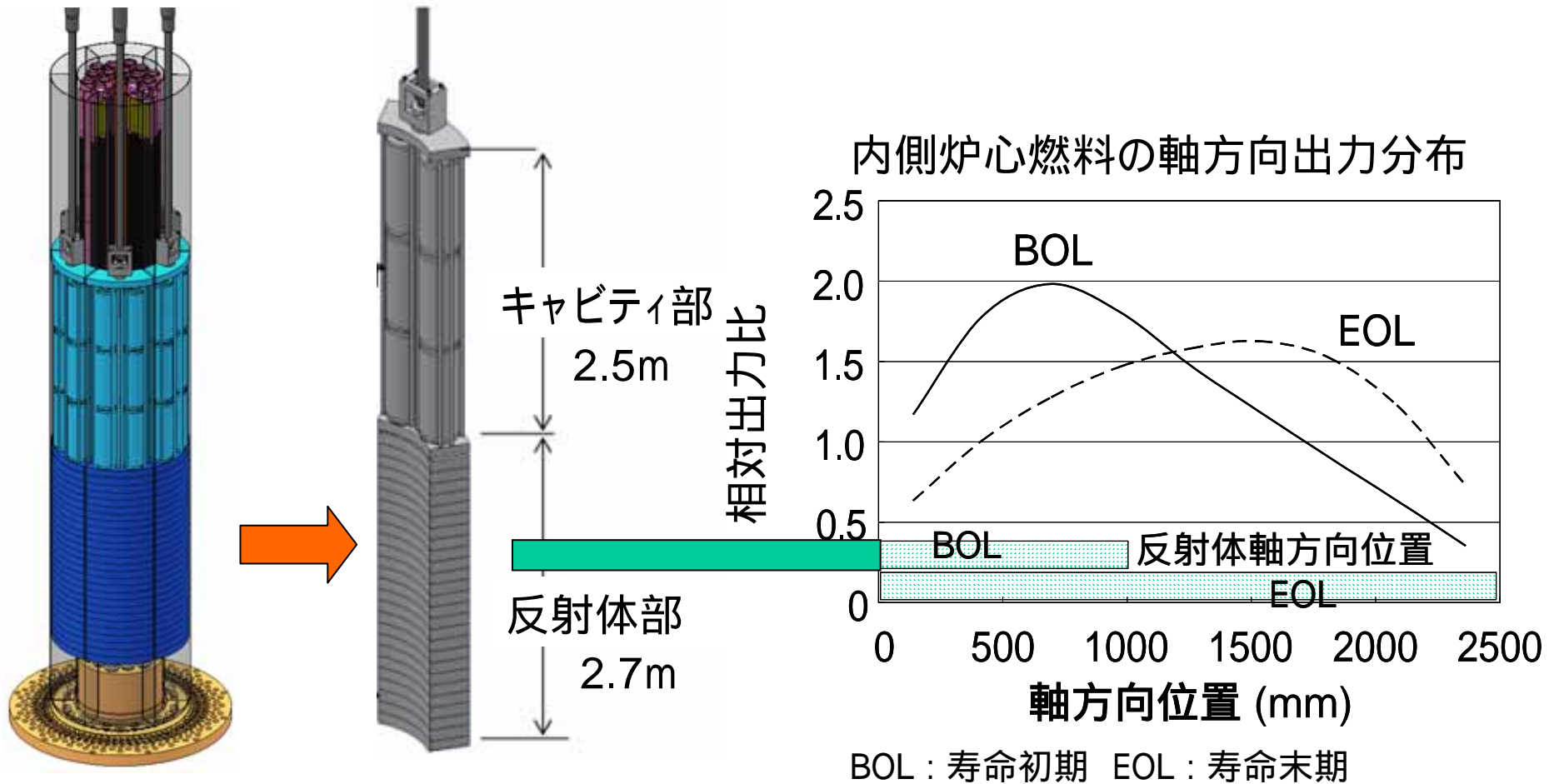
燃料・炉心

燃料体積比を上げ、密度の高い金属燃料を採用し、燃料長を長くし、燃焼領域を移動させることで長寿命炉心を達成



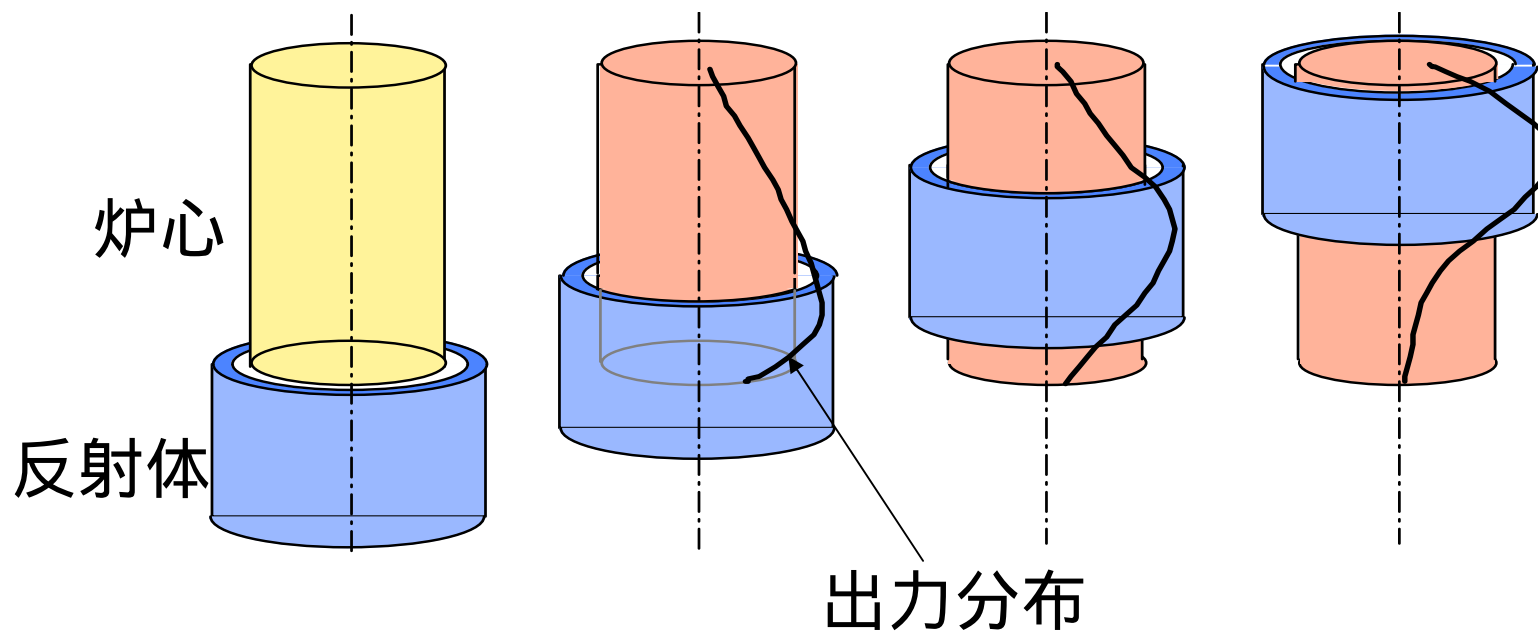
反射体

反射体の置換反応度(移動方向の物質と置換)を向上させることで反応度制御能力を向上 鋼製反射体の上にガス空間からなるキャビティを設置



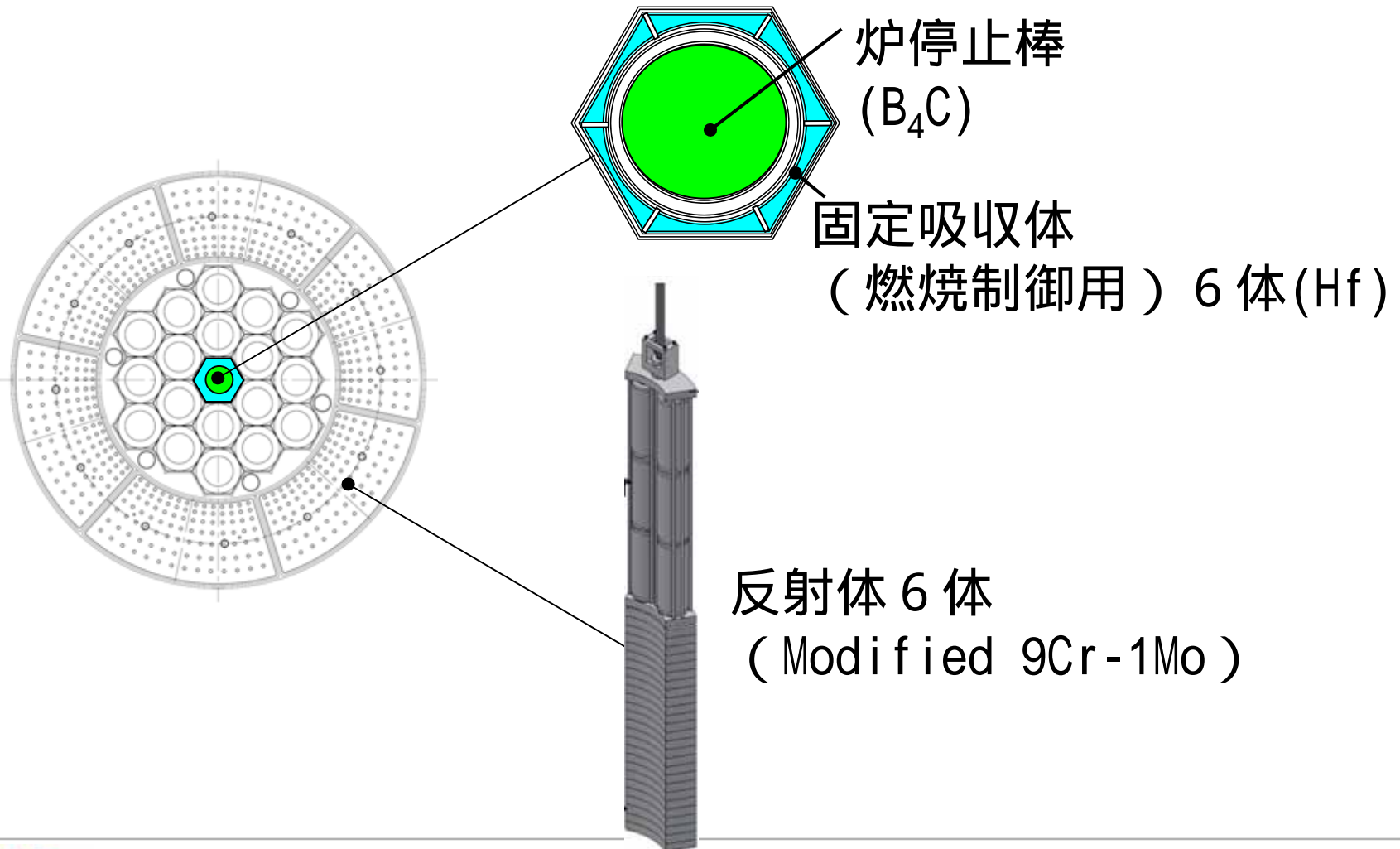
反射体制御概念

- 連続してゆっくり上方に移動(約1mm/週)
- 徐々に炉心を覆い、中性子を反射することで燃焼反応度を補償



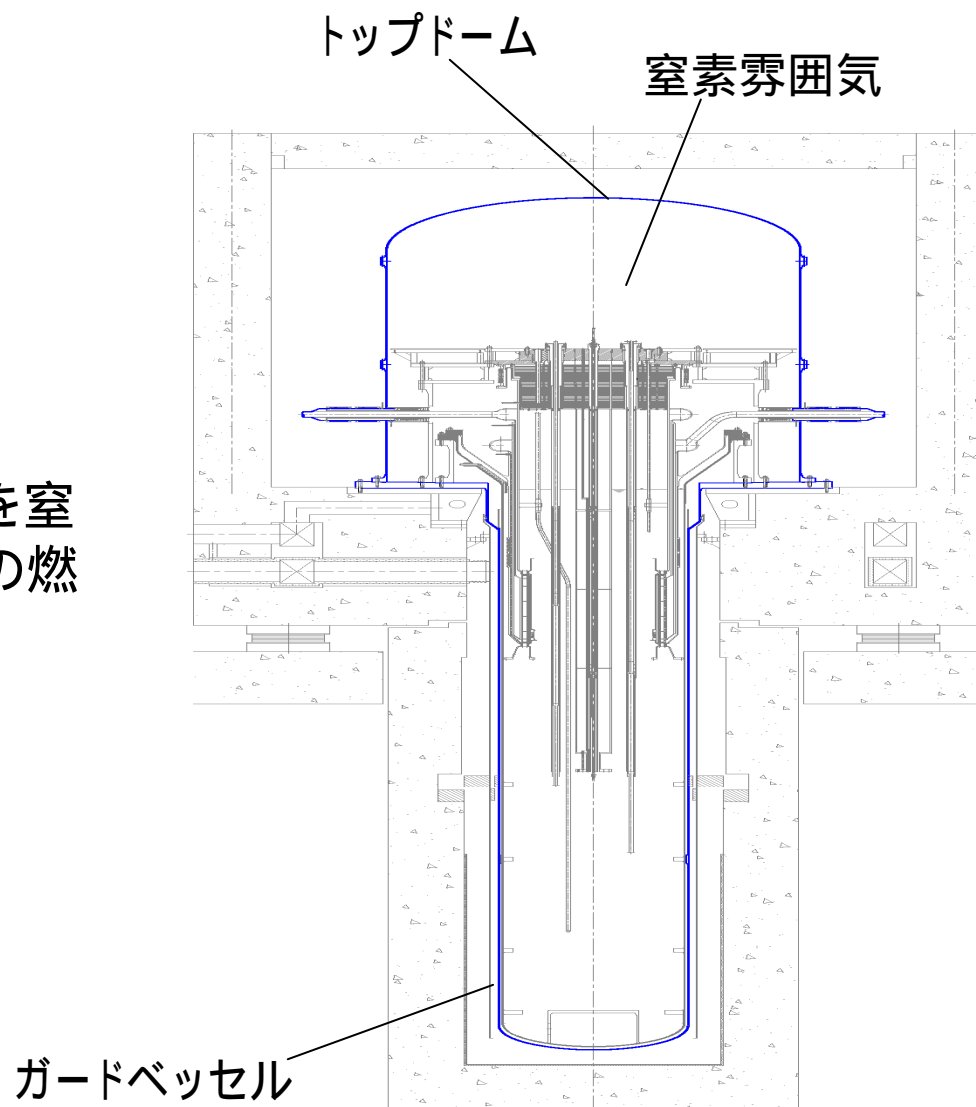
原子炉停止系

- 原子炉停止系：2種類の異なる原子炉停止系を具備



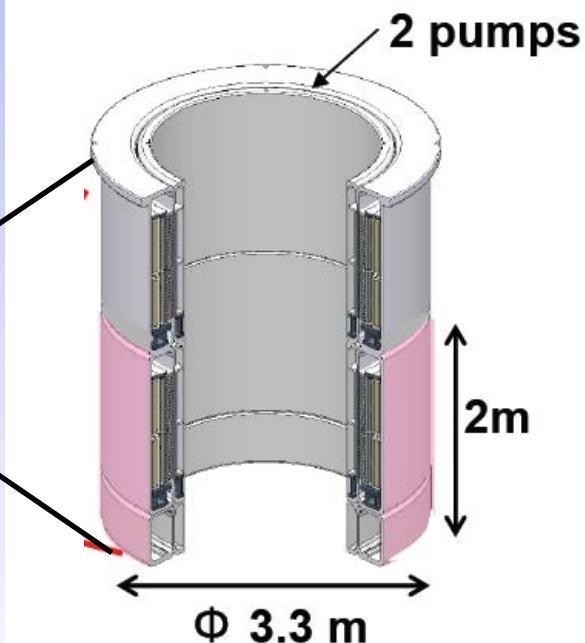
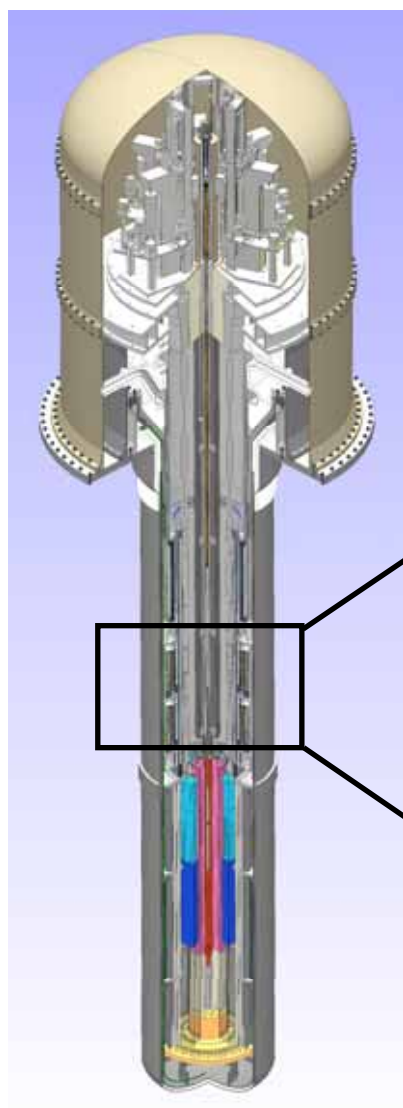
放射性物質の格納

- 燃料
- 燃料被覆管
- 格納施設
 - ガードベッセル(窒素雰囲気)
 - 鋼製トップドーム
 - ガードベッセル、トップドーム内を窒素雰囲気としナトリウム漏洩時の燃焼を抑制
- 原子炉建屋



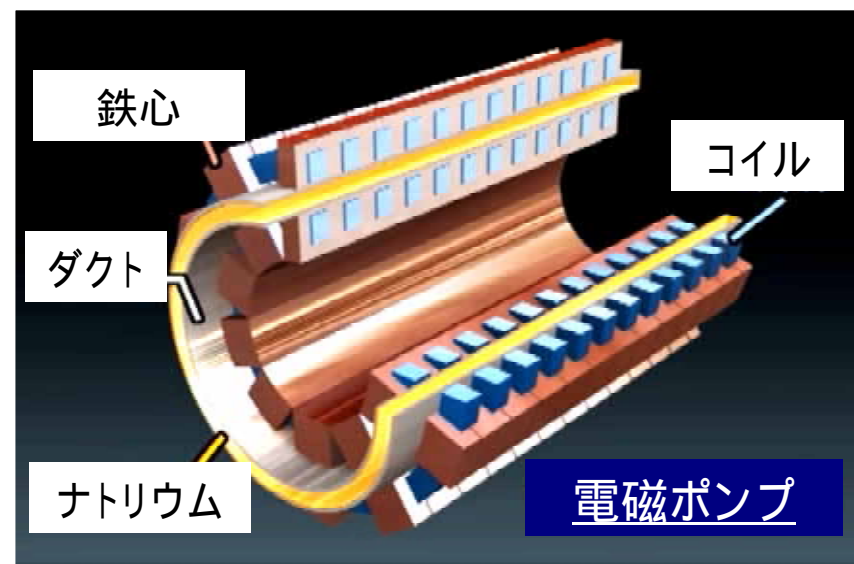
電磁ポンプ

30年間補修不要な炉内設置型の電磁ポンプ



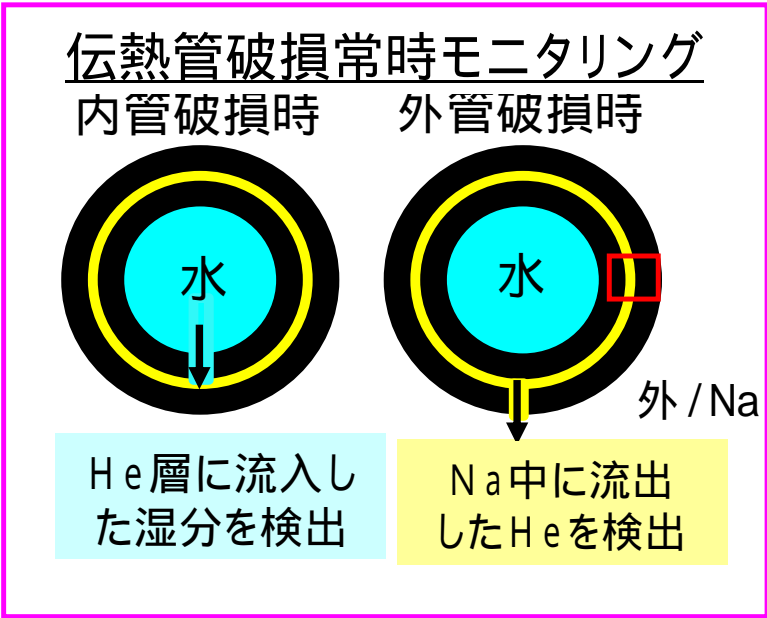
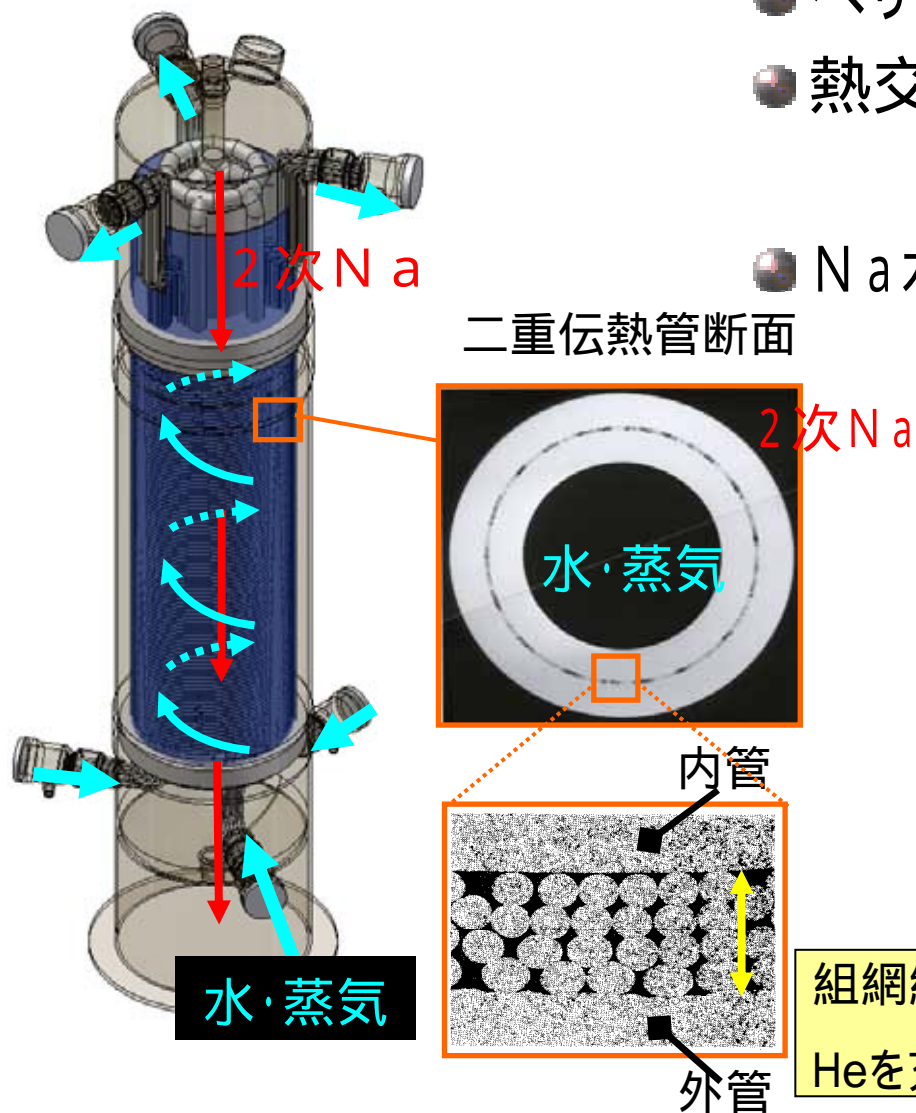
特徴

- 環状流路 線形誘導電動式
- 炉内Na中に浸漬して使用
- 駆動部がなく、メンテナンス要求が低い



蒸気発生器

- ヘリカルコイル型組網線入り二重伝熱管
- 熱交換量 30 MWt(10MWe)
150 MWt(50MWe)
- Na水反応事故の防止

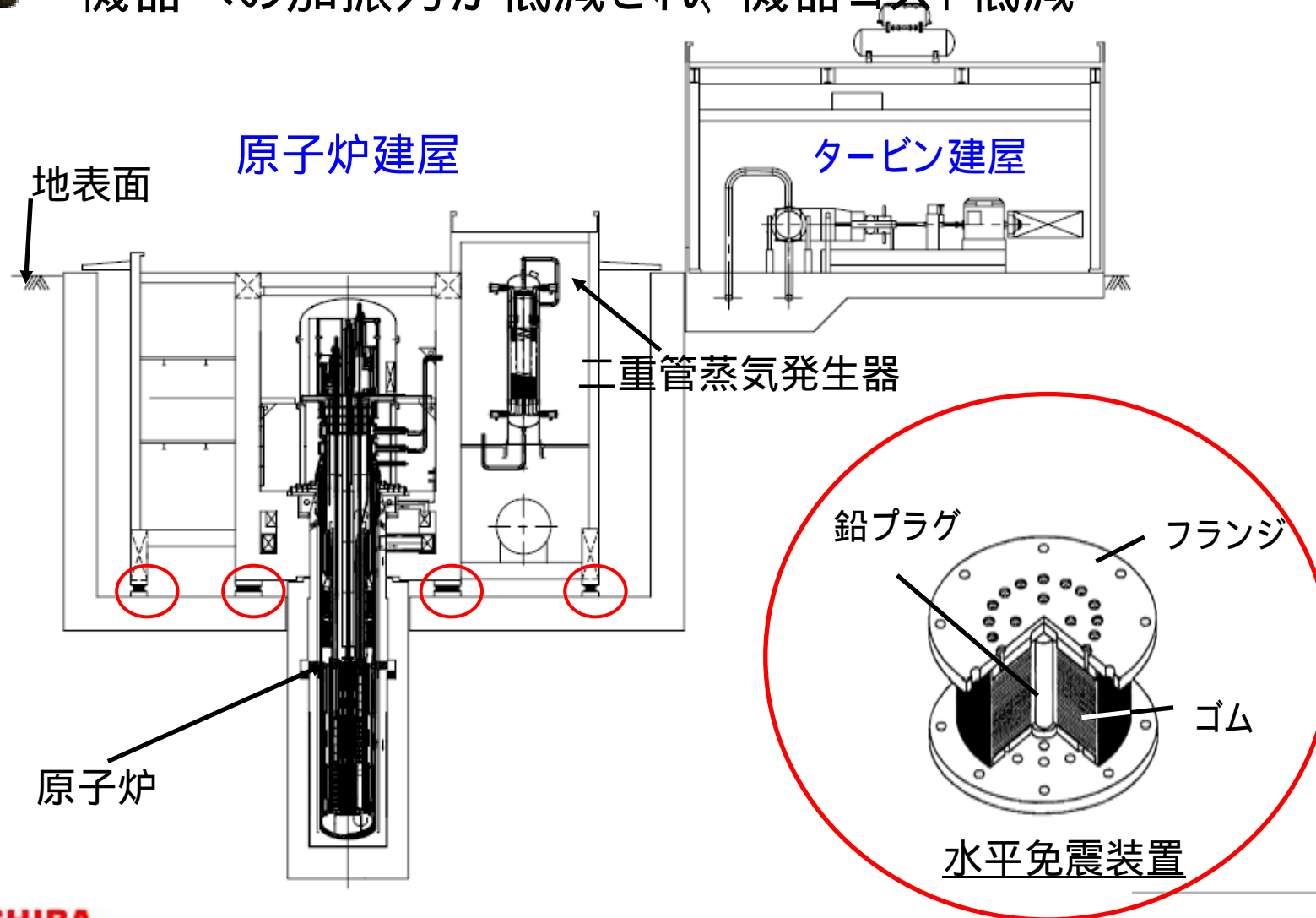


組網線層(0.4mm)
Heを充填(漏洩検出用)

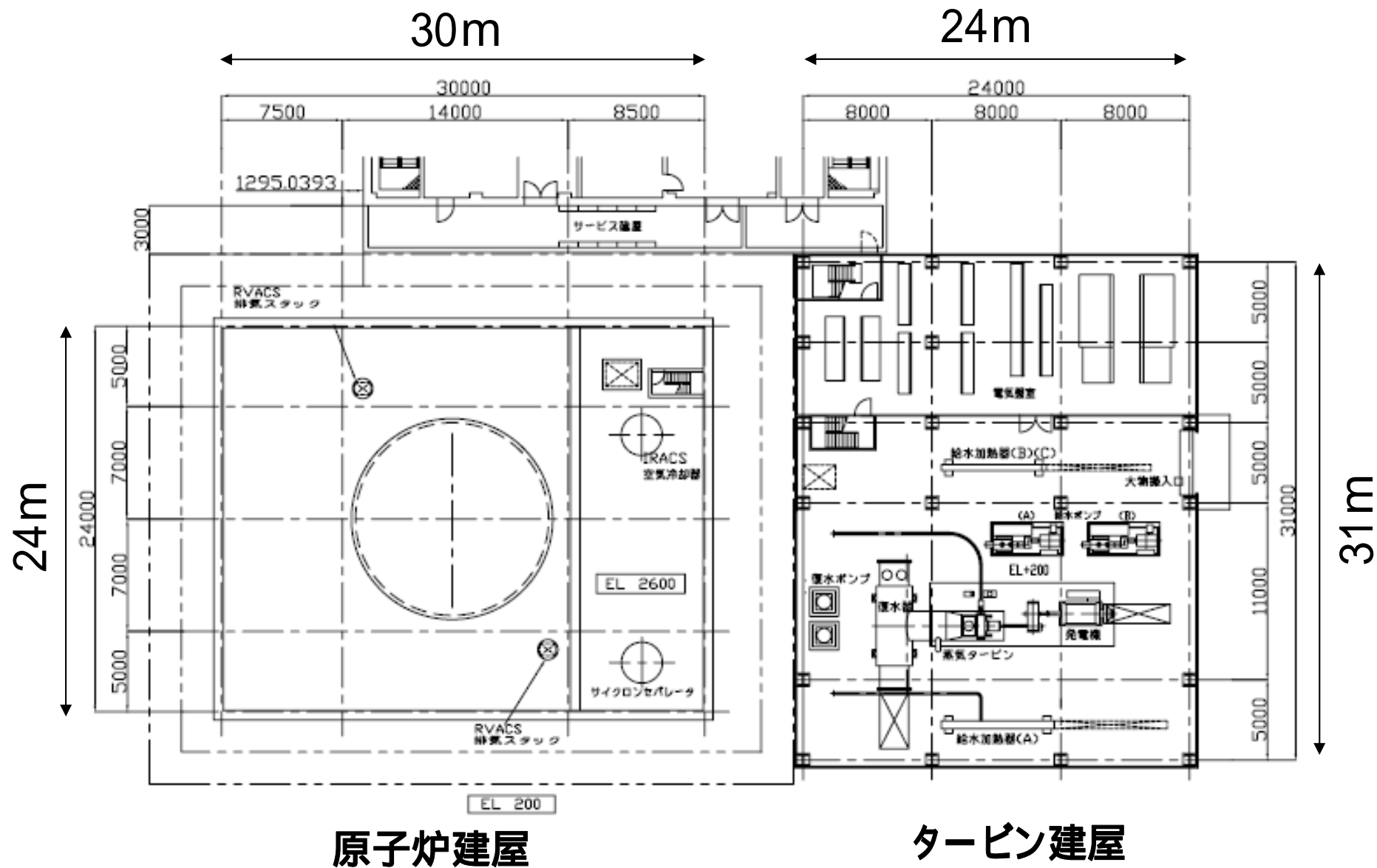
経済産業省：平成21年度革新的実用原子力技術開発費補助事業「GNEPの中小型炉に適合する高信頼性ヘリカル二重伝熱管蒸気発生器の研究開発」の成果を含みます。

免震装置配置

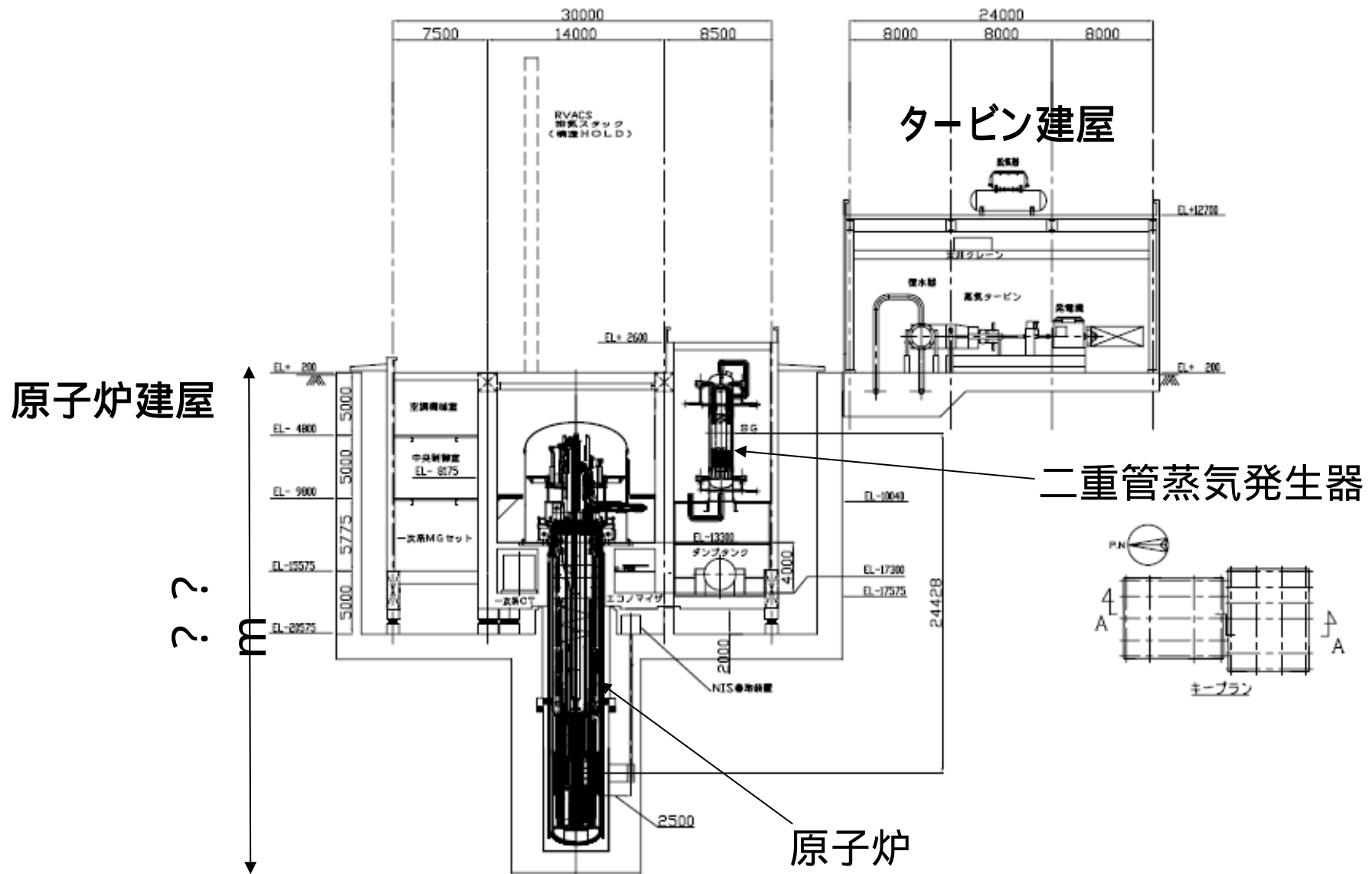
- 立地サイト依存性を極力排除 (標準化設計)
- 機器への加振力が低減され、機器コスト低減



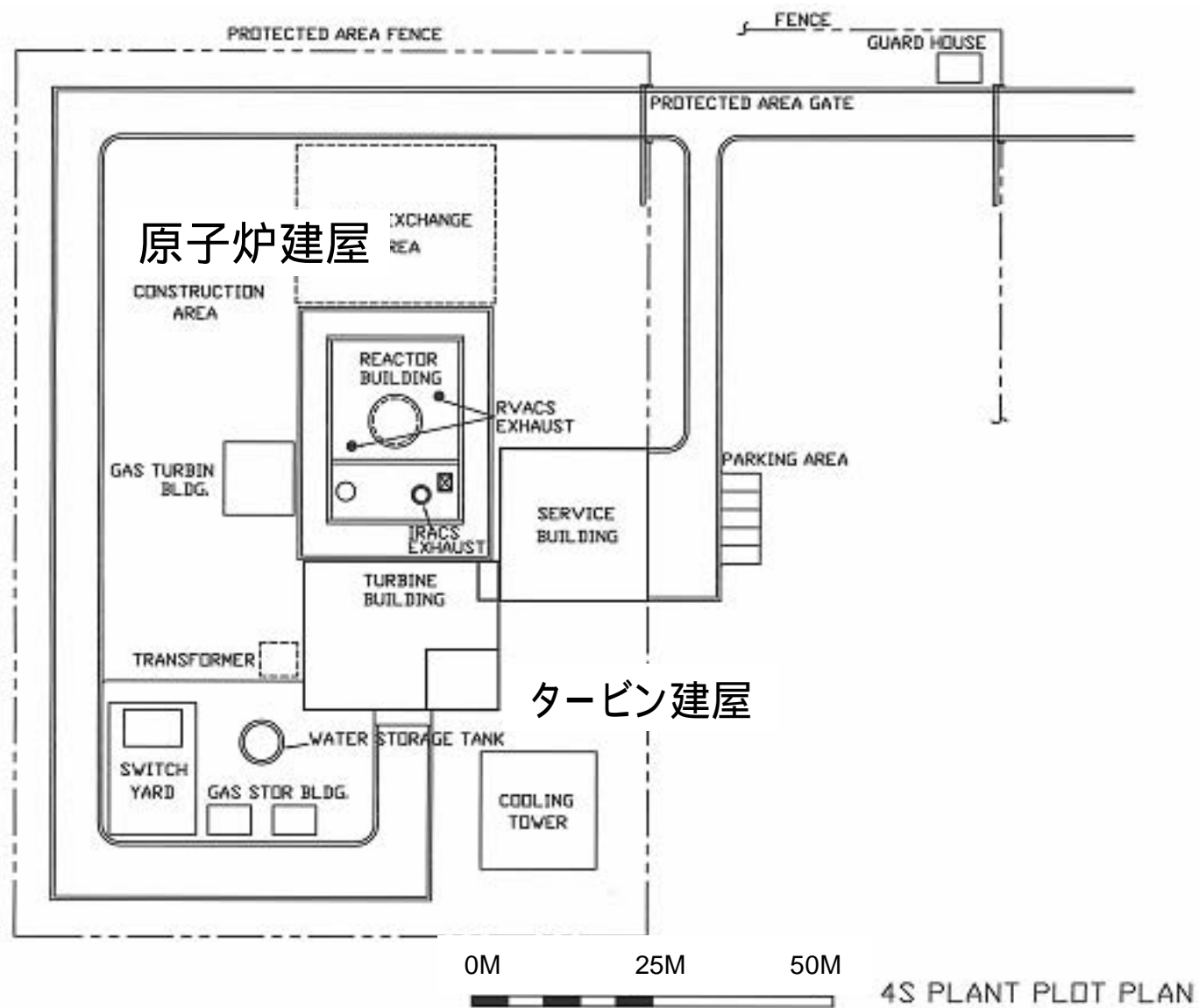
原子炉建物・タービン建物配置



原子炉建物・タービン建屋配置

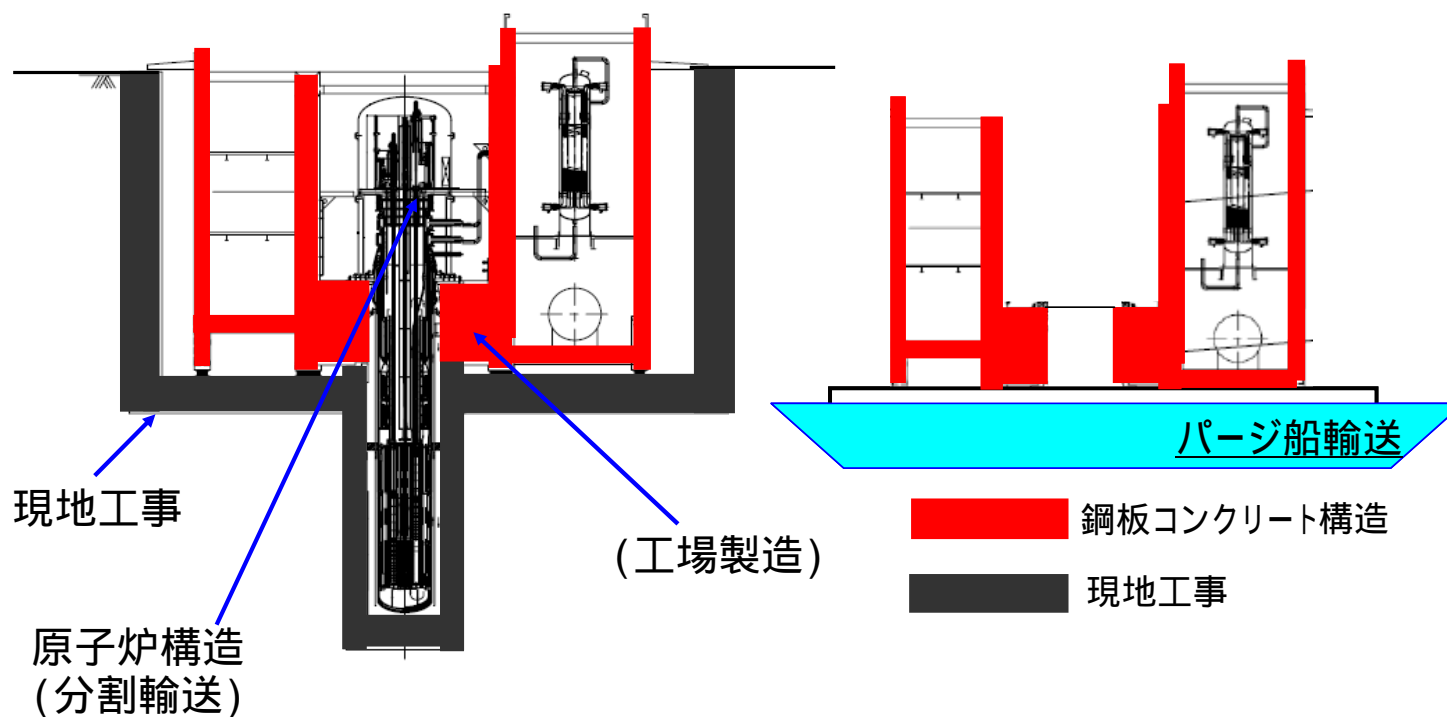


プロットプラン



4 S 建設方法

●現地工事期間短縮によるコスト低減



火力ボイラーモジュールの実例



・サイズ: 28m × 21m × 37m(H)
・重量: 3,000 t

目次

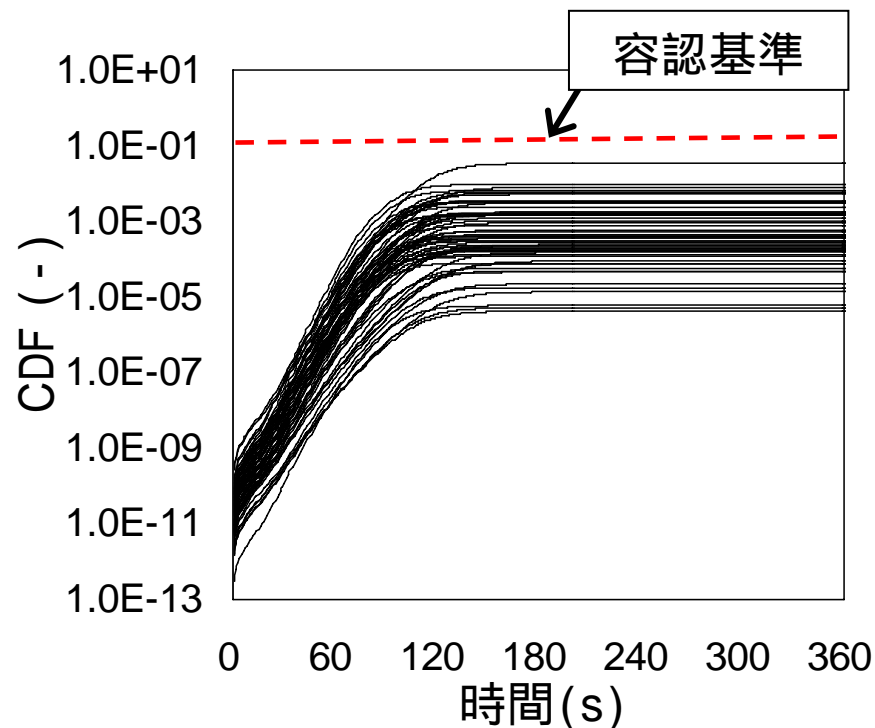
- これまでの経緯
- 小型高速炉4S
- 安全性**
- 小型炉の市場
- 革新技术開発
- 米国許認可申請

安全解析 (ATWS)

● 統計的安全評価手法を用いて評価

不確かさも考慮して十分な裕度をもって被覆管健全性を確保

CDF (累積損傷和 被覆管の健全性を評価する指標 CDF=1で破損) < 0.1



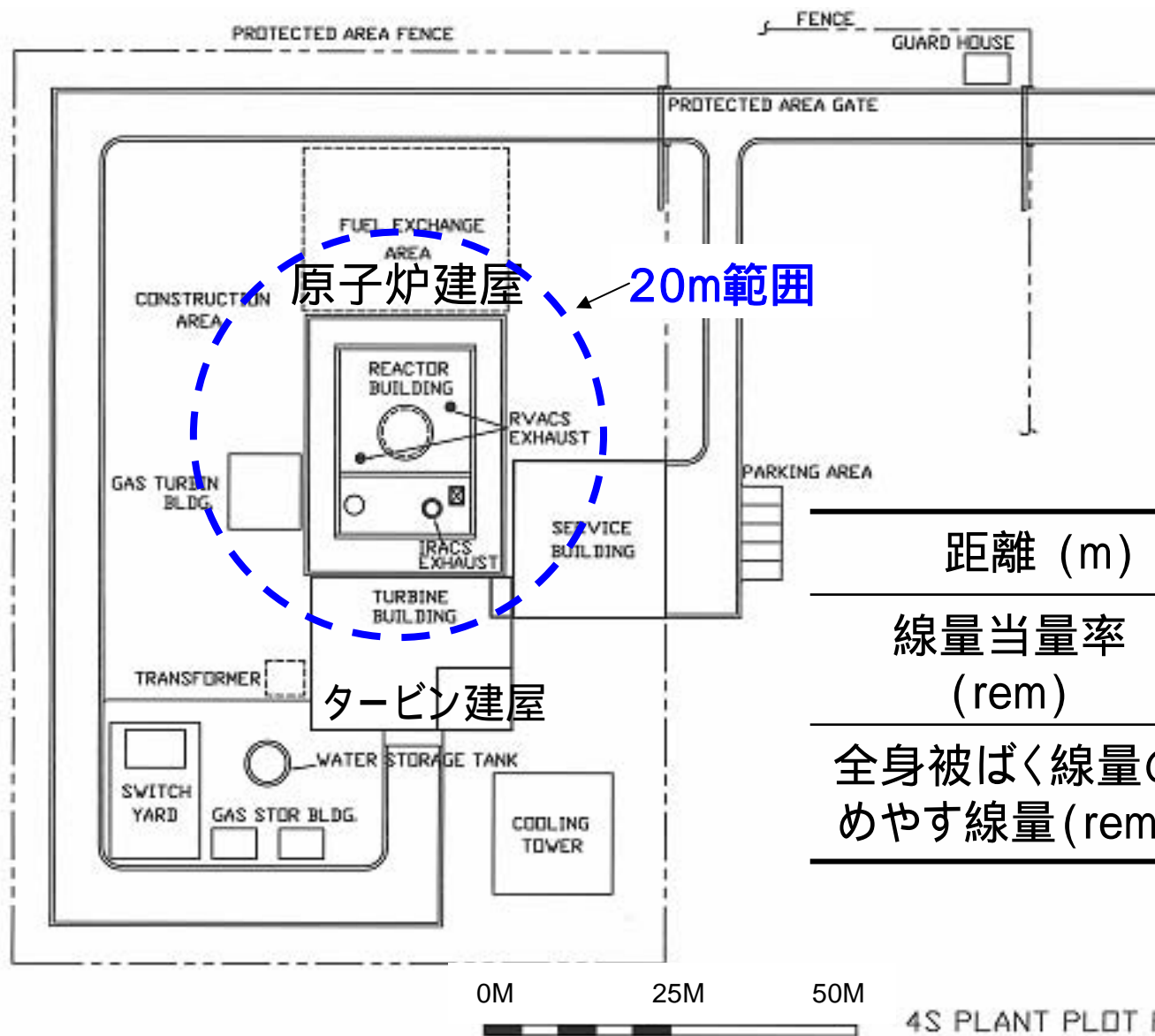
59ケースのULOF事象 解析結果

	95% 確率 95% 信頼度 [-]
ULOF	3.4×10^{-2}
UTOP	3.9×10^{-4}
ULOHS	4.5×10^{-8}

ULOF: Unprotected loss of flow
 UTOP: Unprotected transient of over power
 ULOHS: Unprotected loss of heat sink

CDF: Cumulative Damage Fraction

放射能外部放出時の離隔距離 (50MWe 4S)



距離 (m)	20
線量当量率 (rem)	3
全身被ばく線量のめやす線量 (rem)	25

目次

- これまでの経緯
- 小型高速炉4S
- 安全性
- 小型炉の市場**
- 革新技术開発
- 米国許認可申請

関心顧客の需要地

Physical Map of the World, April 2004

- **米国** アラスカ先住民地区と鉱山、ハワイ、本土
- **カナダ** オイルサンド開発、U鉱山開発、先住民地区
- **サウジ、UAE** 淡水化
- **欧州** 船舶用途、電源用途
- **他** モンゴル、ナイジェリア、フィリピン、インドネシア

アラスカ州ガリーナ

- ガソリンは空輸、発電・暖房用ディーゼル燃料はバージ船で運搬（夏季のみ）



- DOE環境スタディ（2004）
- 4S誘致に向けた評議会決議（2004）



写真: Yoder, ANS Annual Meeting (2005)

アラスカ候補地

● 10 MWe :

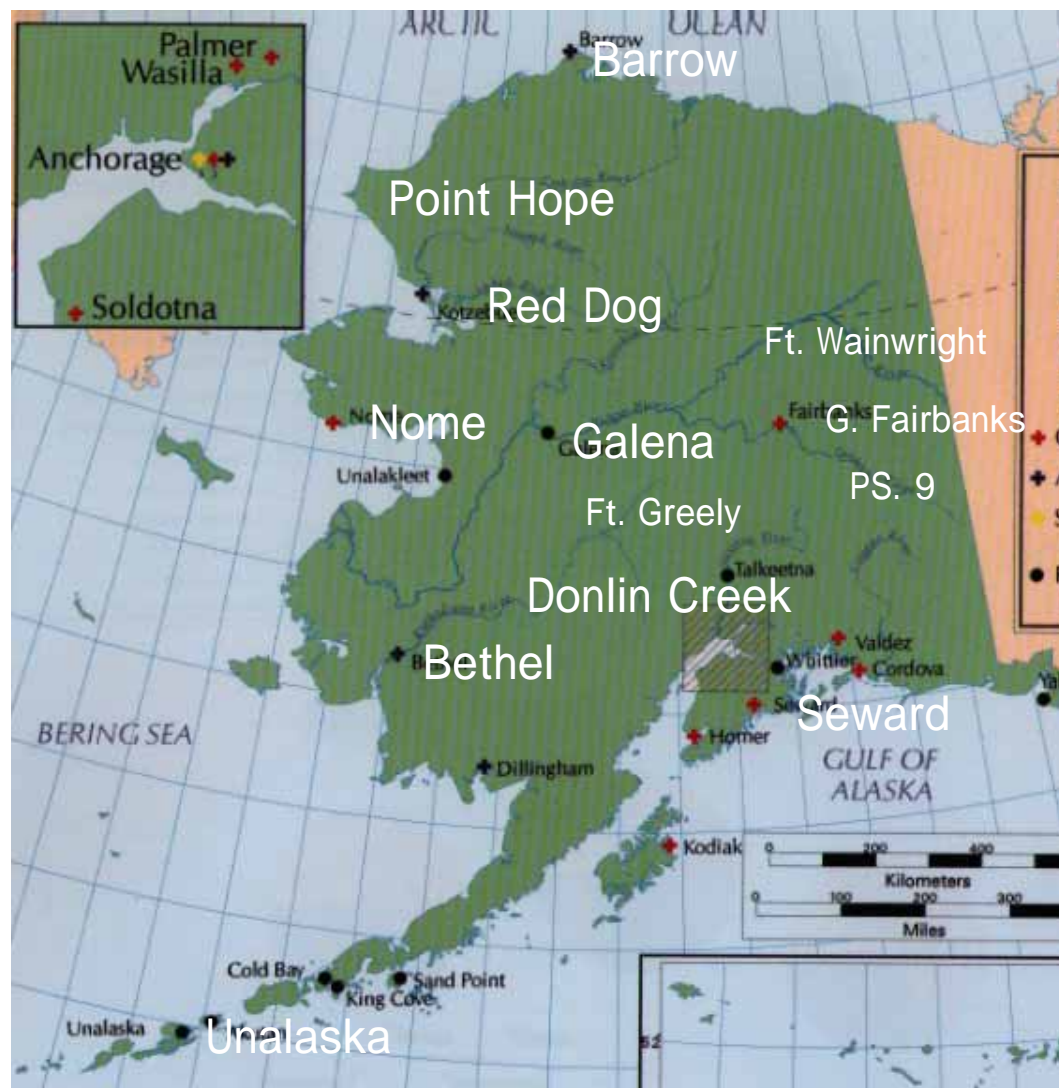
市町村用

● 50 MWe :

市町村用

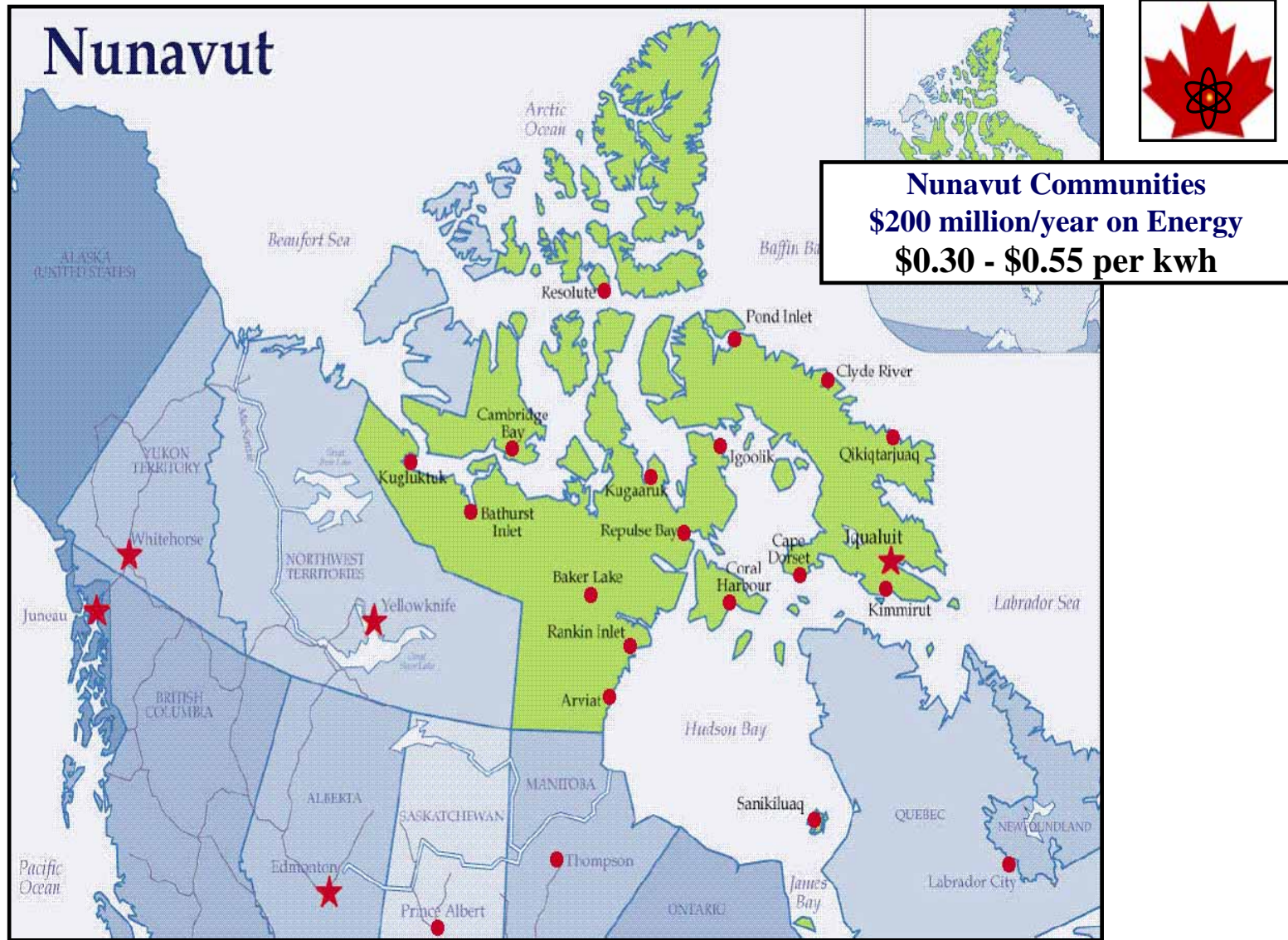
鉱山開発用

パイプライン基地用



地図提供: アラスカ州政府日本支局

カナダ遠隔地電源



海水脱塩

稼動中の海水脱塩プラントの消費電力: 3 ~ 50 MWe

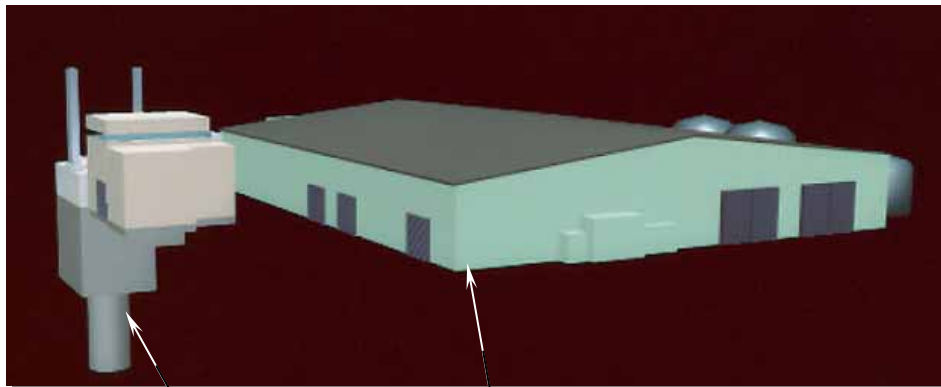
4S 淡水生産量:

34,000 m³ / day (10 MWe) 約11万人

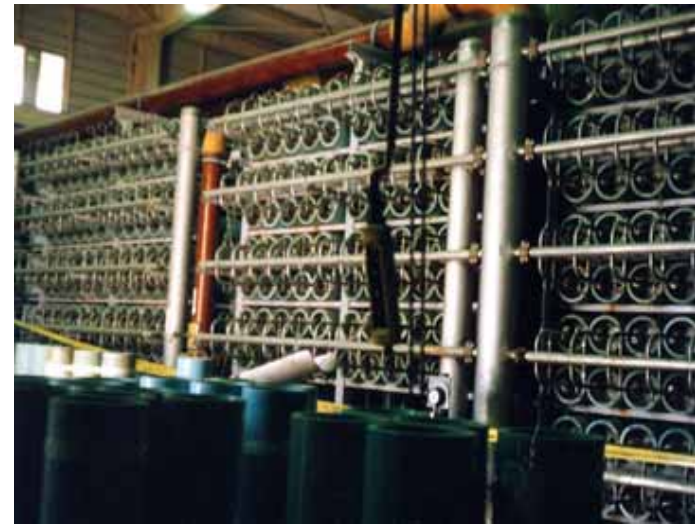
168,000 m³ / day (50 MWe) 約56万人

@ (日本300L / man day)

二段逆浸透膜法



4S 脱塩プラント



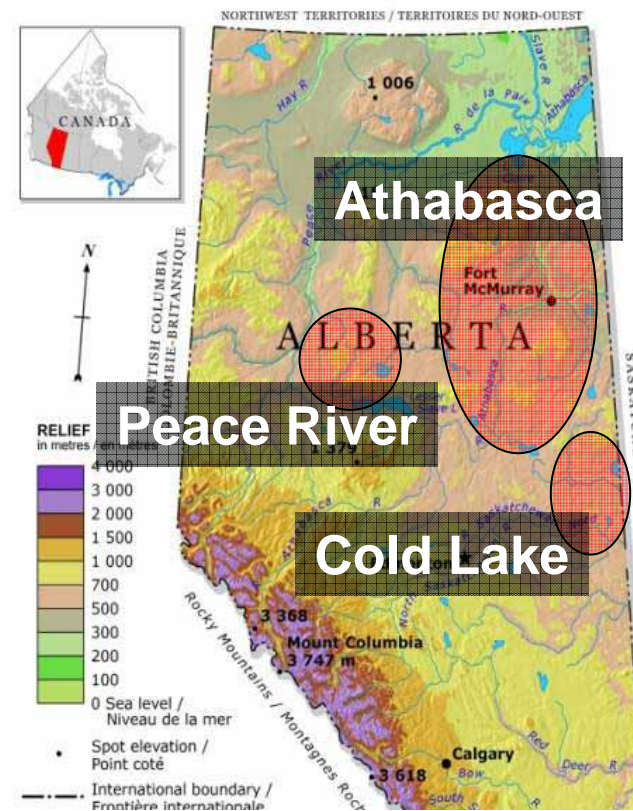
オイルサンド採掘



SOURCE: Suncor, www.suncor.com

オイルサンド: 140万b/day
消費熱量: 11GWth

(80基相当)



アルバータ州 カナダ

Source: Natural Resources Canada, 2002, and JACOS/JAPEX

March 10 (Bloomberg) -- Canada will require Syncrude Canada Ltd., Suncor Energy Inc. and other companies that extract oil from tar sands to capture and store carbon emissions from new sites starting in 2012.

オイル・サンド SAGD法

オイルサンドプラントの消費熱: 4 S 1基 ~ 8基分 / 1プラント

蒸気注入

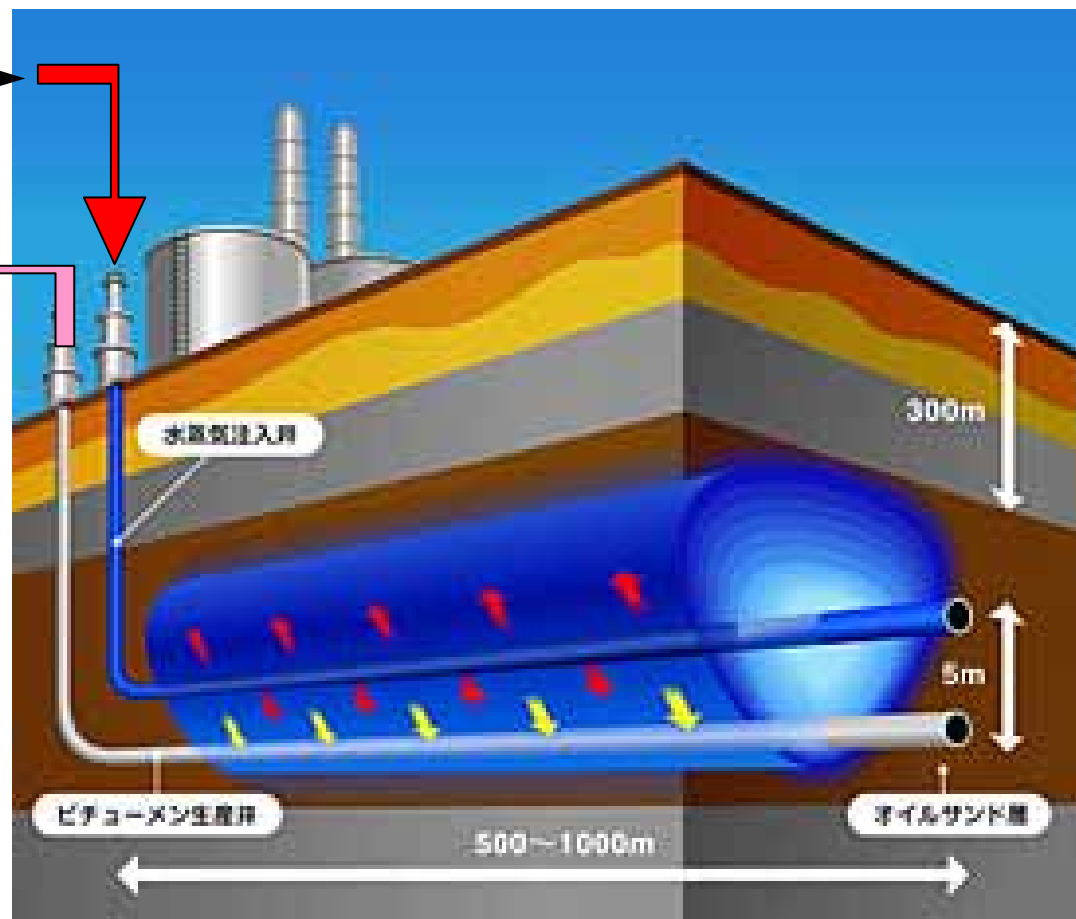
250 ~ 300°C

5 ~ 6MPa

ビチューメン



写真: JACOS/JAPEX



SAGD: Steam Assisted Gravity Drained

図出典: JAPEX, www.japex.co.jp

水素製造

- 水から水素を製造 (二酸化炭素排出なし)

- 用途

 - 夜間電力貯蔵 (負荷調整)

 - 水素供給 (車、石油化学)

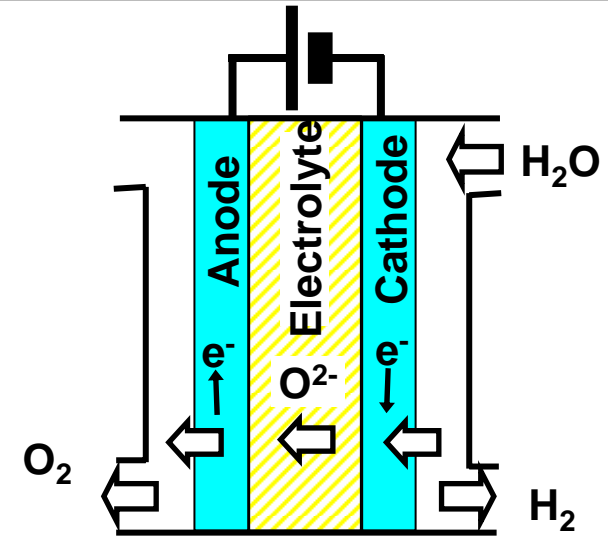
- 製造容量 (4 S 50MWe)

 - 電気分解 4600 Nm³/h

 - FC車約0.4万台/day

 - 高温水蒸気電解 15000 Nm³/h

 - FC車約1.3万台/day



Maximum H₂ production rate : 0.13Nm³/h
with 15 cells (active area : 13mm x 200mm)

高温水蒸気電解マルチセル試験装置
(Solid Oxide Electrolyte Cell)

多目的利用小型原子炉の望ましい要件

● 出力・蒸気温度の範囲

電気出力 50MWe以下
熱出力 130MWt以下
蒸気温度 500 付近

● 機能要件

高い安全性

固有安全性具備
事故時退避不要
自然災害に対する耐性

高度な安全保障

原子炉密封維持
テロ・航空機落下対応

容易な運転性

保守量の低減
燃料交換なし

容易な輸送、建設、解体

現地工事ミニマム(プレハブ化)
プラントの小型化、軽量化
プラント廃棄物・燃料の管理・廃棄の容易さ

目次

- これまでの経緯
- 小型高速炉4S
- 安全性
- 小型炉の市場
- 革新技術開発**
- 米国許認可申請

これまでに実施した実証試験

設計	検証項目	必要な試験	現状
長尺小径炉心	反射体制御金属燃料炉心の核設計手法	臨界実験	完了
反射体制御炉心			
高燃料体積比金属燃料炉心	燃料集合体部の圧力損失特性	流動試験	完了
反射体	反射体微小駆動機構	駆動装置試験	完了
RVACS	炉容器 - 空気間の伝熱特性	RVACS 伝熱特性試験	完了
電磁ポンプ	構造健全性 運転特性	電磁ポンプのNa試験	実施中
二重管蒸気発生器	構造健全性 伝熱特性 破損検知システム	Na試験 伝熱管破損検知試験	実施中
免震装置	原子力発電所への適用性	免震装置試験	完了

臨界試験

●4S炉心模擬体系での臨界試験完了

4Sの核特性及び制御性を確認

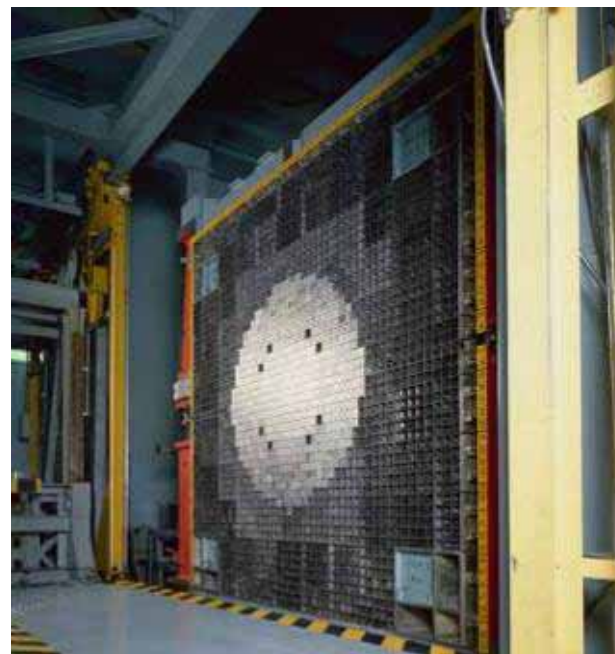
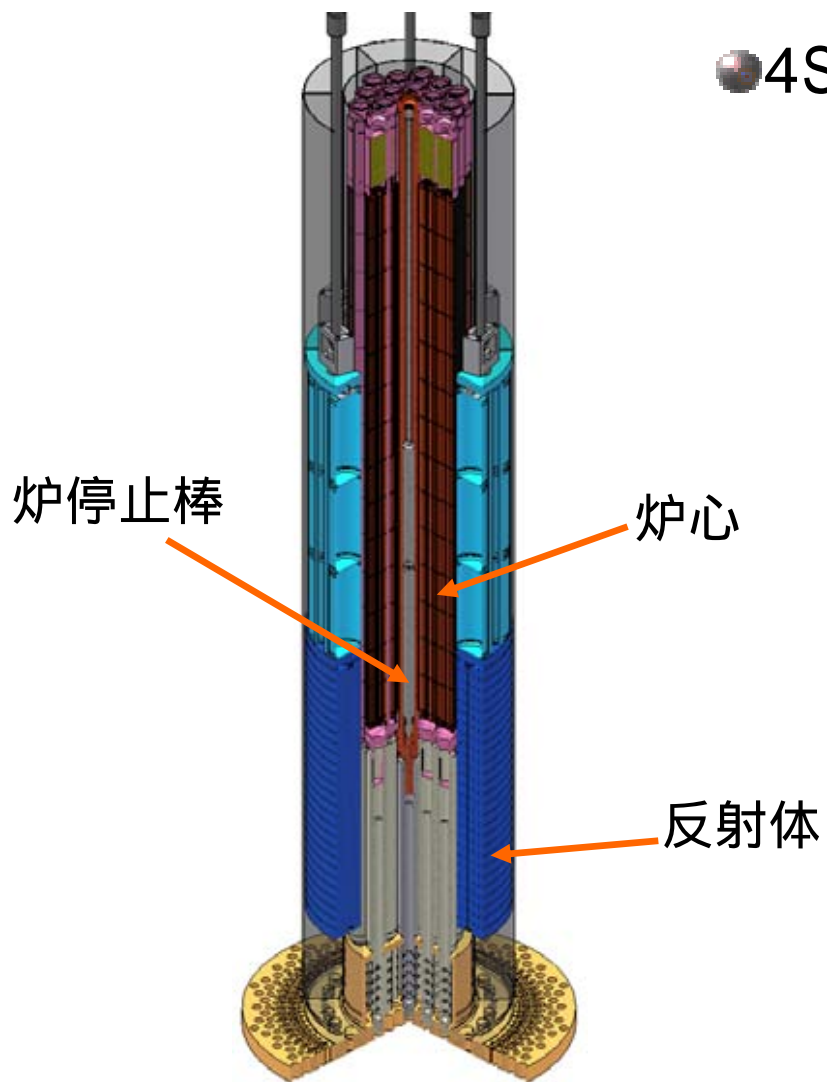


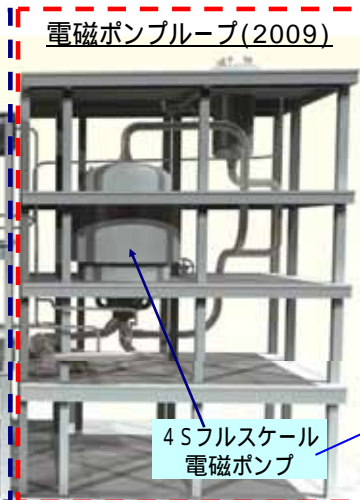
Photo ; FCA (offered by JAEA)

反射体制御炉心

R&D has been performed by CRIEPI in collaboration with JAEA as a part of “ Innovative Nuclear Energy System Technology (INEST) Development Projects” under sponsorship of MEXT (JAPAN).

当社Na機器試験施設

仕様	最高使用温度	600
	加熱/冷却能力	500/600kW
	ナトリウム保有量	8ton
	ナトリウム流量	12m ³ /min
試験能力	ナトリウム浸漬試験	試験容器 内径 1.0m, 高さ 3.5m



Naループ 鳥瞰図

電磁ポンプループ外観



マゼーループ外観

高速炉研究棟 Naループ制御室

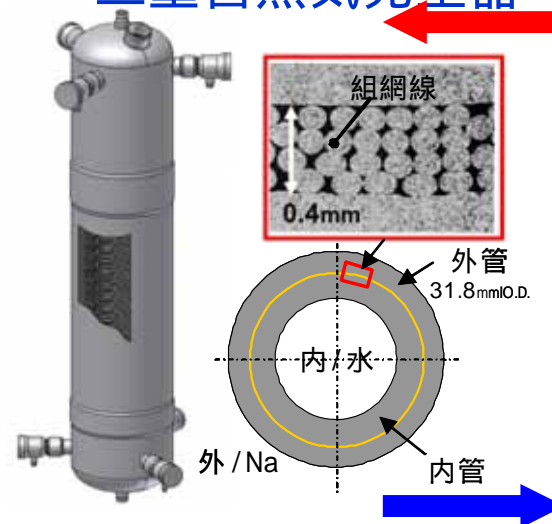
高速炉研究棟 外観

Na機器試験施設で最終実証中の機器

● Na・水反応事故を起こさない組網線入りヘリカル二重管蒸気発生器

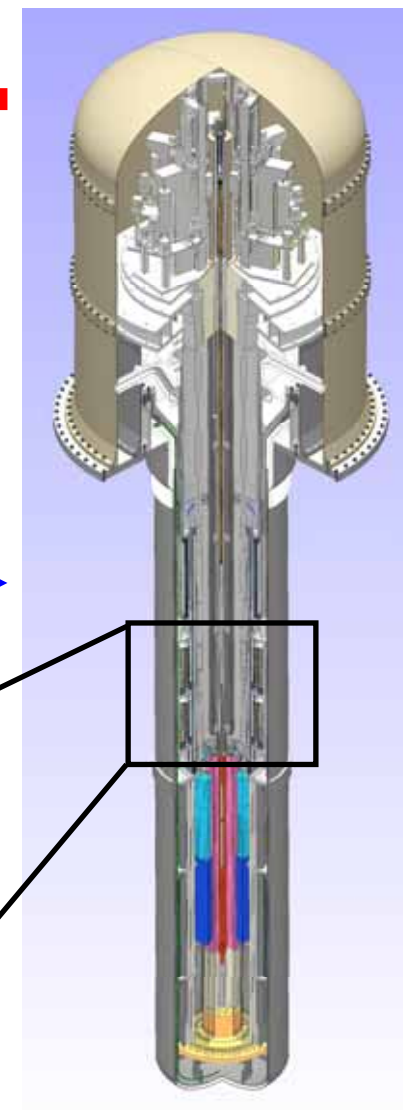
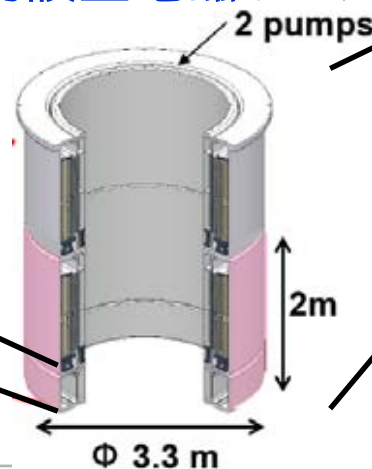
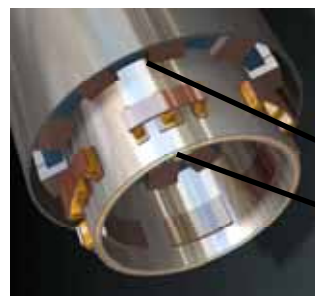
● 30年間補修不要な炉内設置型の電磁ポンプと電磁流量計

組網線入りヘリカル二重管蒸気発生器



炉内設置電磁ポンプ

炉内設置電磁流量計



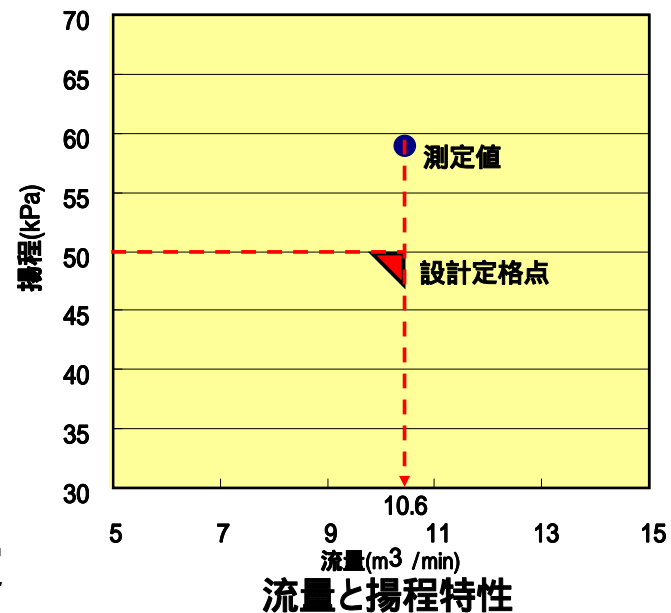
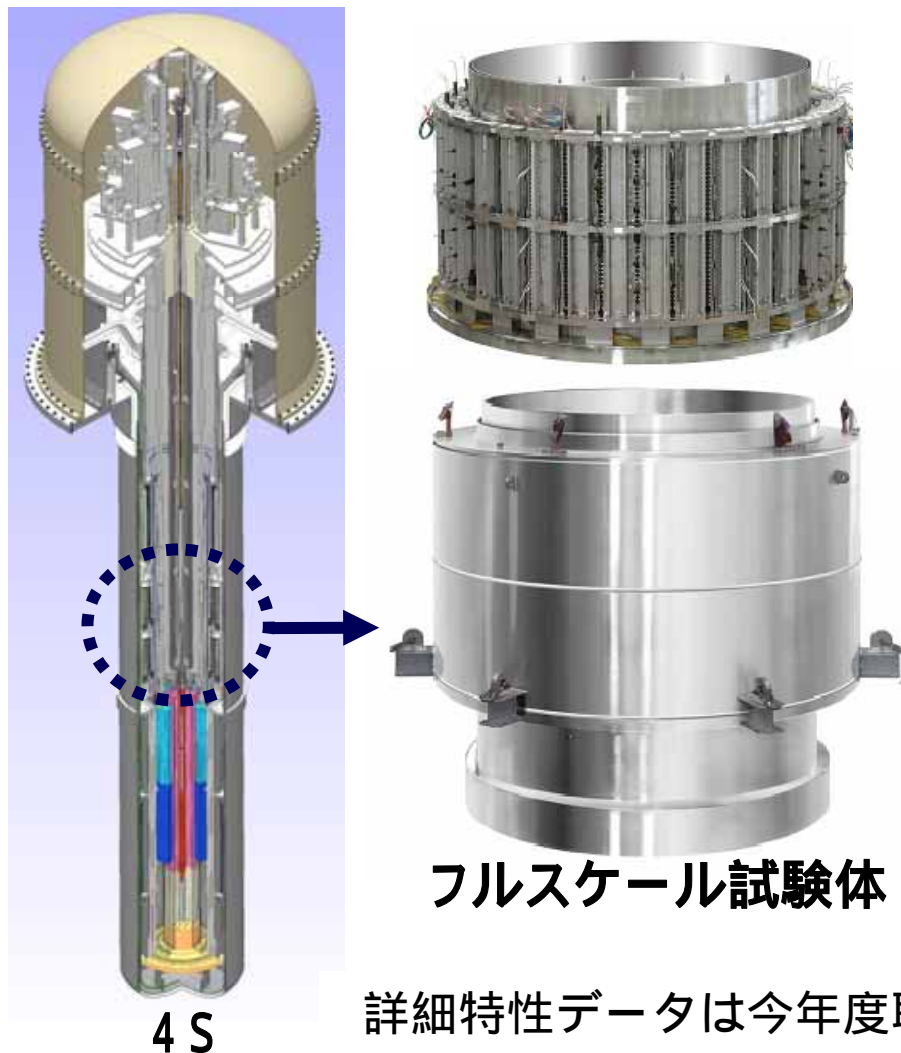
炉内設置電磁ポンプの開発と実証試験 (METI補助金)

● 10 MWe用世界最大径ポンプの製作性確認とポンプ性能実証

設計定格点 流量: $10.6 \text{ m}^3 / \text{min}$
揚程: 50 kPa
Na温度: 355

フルスケール電磁ポンプを製作し、設計通りの磁気性能を確認 (FY08)

ループ建設とNa試験でポンプ設計定格を満足していることを確認達成 (FY09)

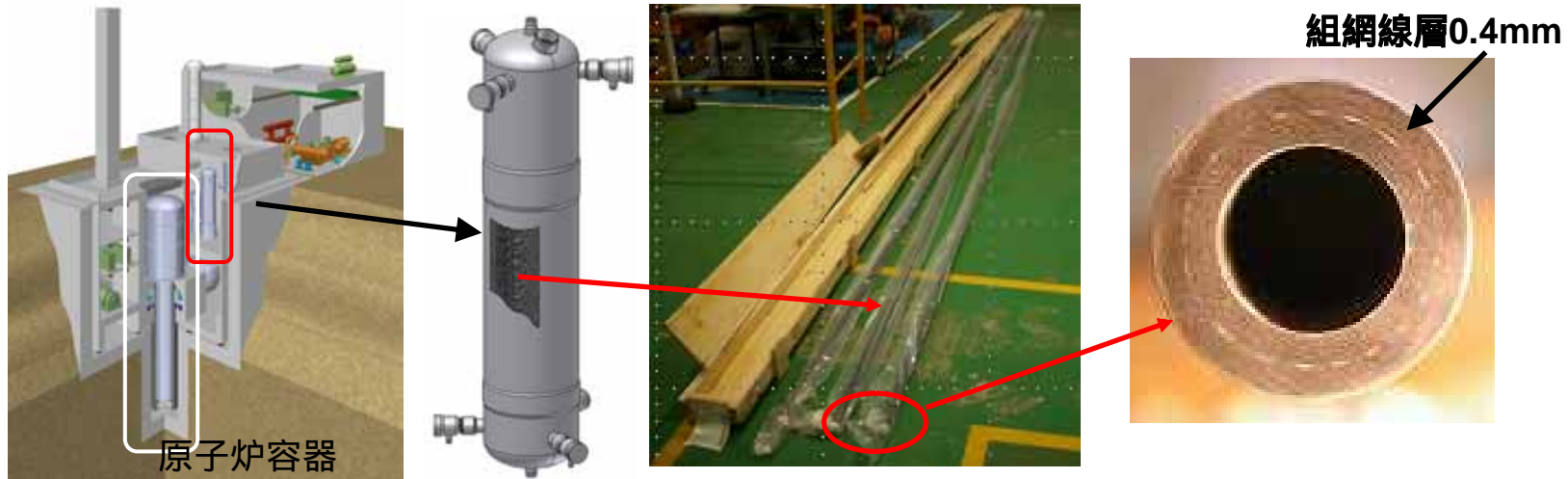


組網線入りヘリカル二重管SGの開発 (METI補助金)

●組網線入り二重伝熱管の溶接による長尺化技術確立 組網線入り二重管

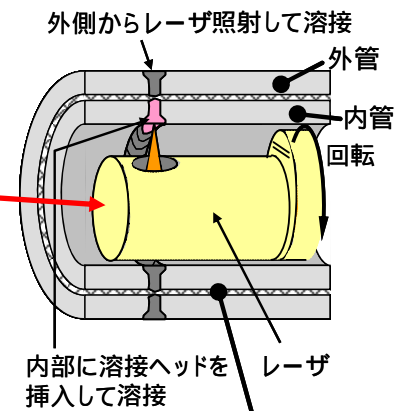
組網線入り二重管製作 実機仕様10mに成功(FY09)

(mod.9Cr-1Mo)



溶接による伝熱管長尺化 レーザ溶接で二重管の管 - 管溶接技術を確立(FY09)

レーザー溶接機 試作機



内管溶接ビード



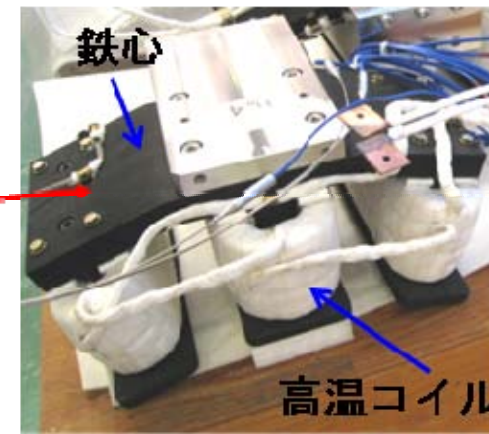
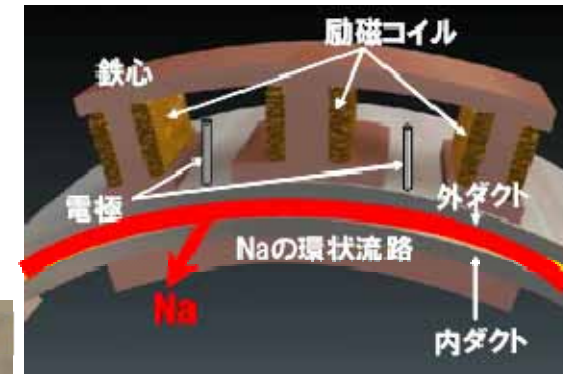
二重管断面

長尺伝熱管のヘリカル化は今年度実施予定

組網線層(0.4mm)

新型環状電磁流量計実証試験 (MEXT公募)

- 高温高放射線環境下で使用
- 環状流路での流量計測



電磁流量計コイル部

試験体

環状流路型 電磁ポンプと一体化
(図は流量計部のケーシングを除いて図示)

目次

- これまでの経緯
- 小型高速炉4S
- 安全性
- 小型炉の市場
- 革新技术開発
- 米国許認可申請**

米国許認可プロセスを開始



出展: NRCホームページ

第1回 「プロジェクト計画とプラント概要」 平成19年10月23日
 決定論的審査の意向、炉心損傷事故への関心、安全性試験



第2回 「金属燃料」「系統設計」平成20年2月21日
 燃料及び被覆管の新たな照射の要否



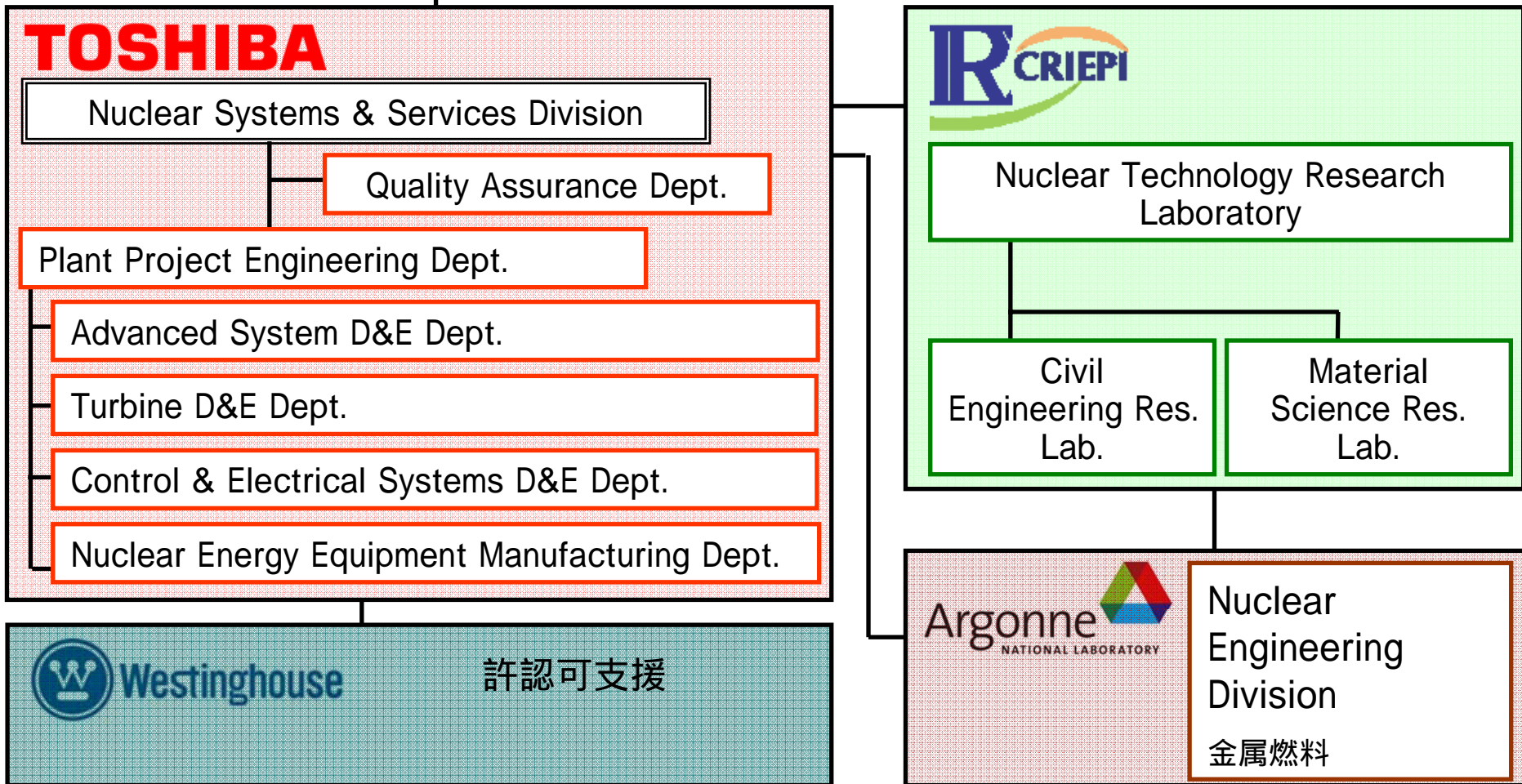
第3回 「高速炉安全設計及び評価方針の提案」
 平成20年5月21日
 設計方針(基準)確立には独立機関の参加を要請された



第4回 「PIRT 及びNRCポリシーへの適合性」 平成20年8月8日
 PIRT手法による4Sの安全性検証計画、NRCリスク低減ポリシー
 (平成20年5月8日発表)への対応
 注) PIRT: Phenomena Identification and Ranking Table

事前審査の体制

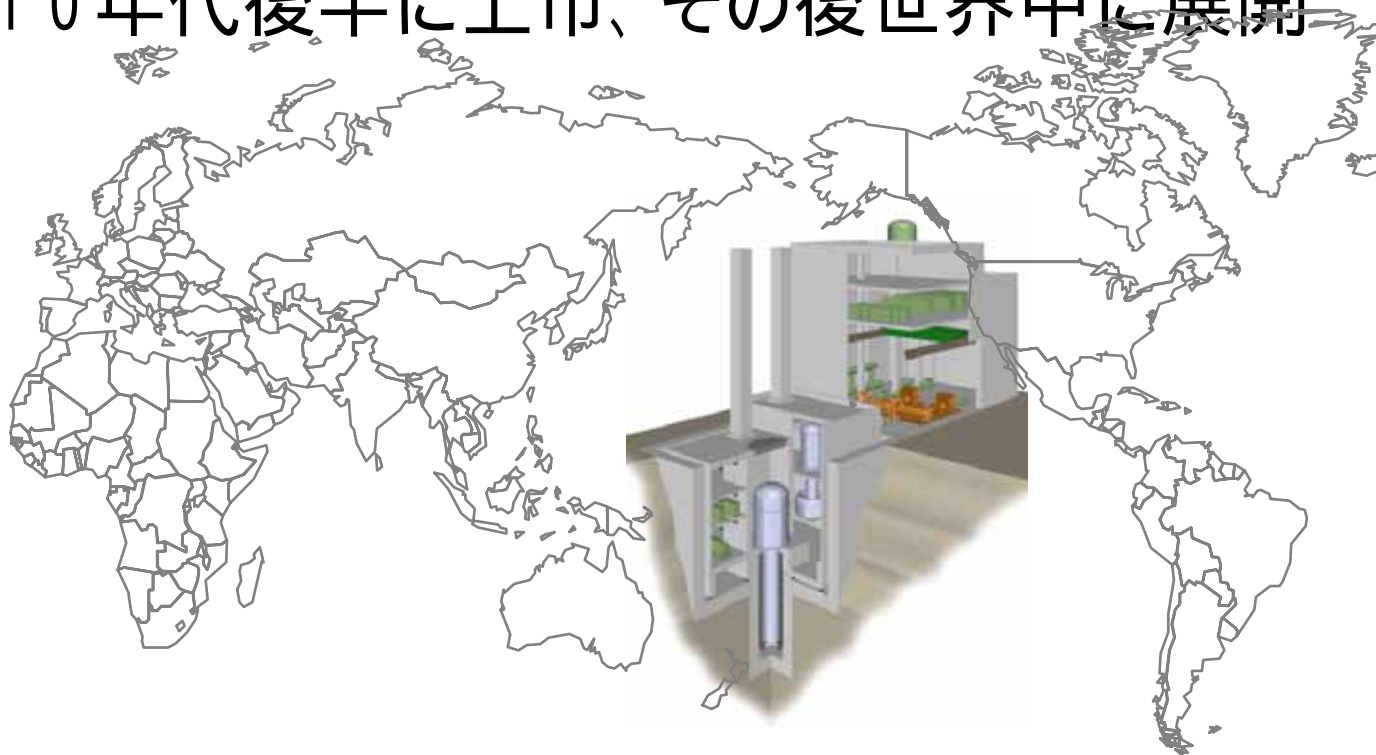
プロジェクト マネージメント 東芝



まとめ

4 Sは……

- 多目的用途に適したニュークリアバッテリー
- 遠隔地エネルギー問題解決の答えのひとつ
- 2010年代後半に上市、その後世界中に展開



TOSHIBA

Leading Innovation >>>