

キヤノングローバル戦略研究所 ビデオクリップ

小型モジュール炉 (SMR) とその応用



2021年12月17日(金) 14:00~15:00

東京工業大学 ゼロカーボンエネルギー研究所
特任教授 奈良林 直 (北海道大学名誉教授)

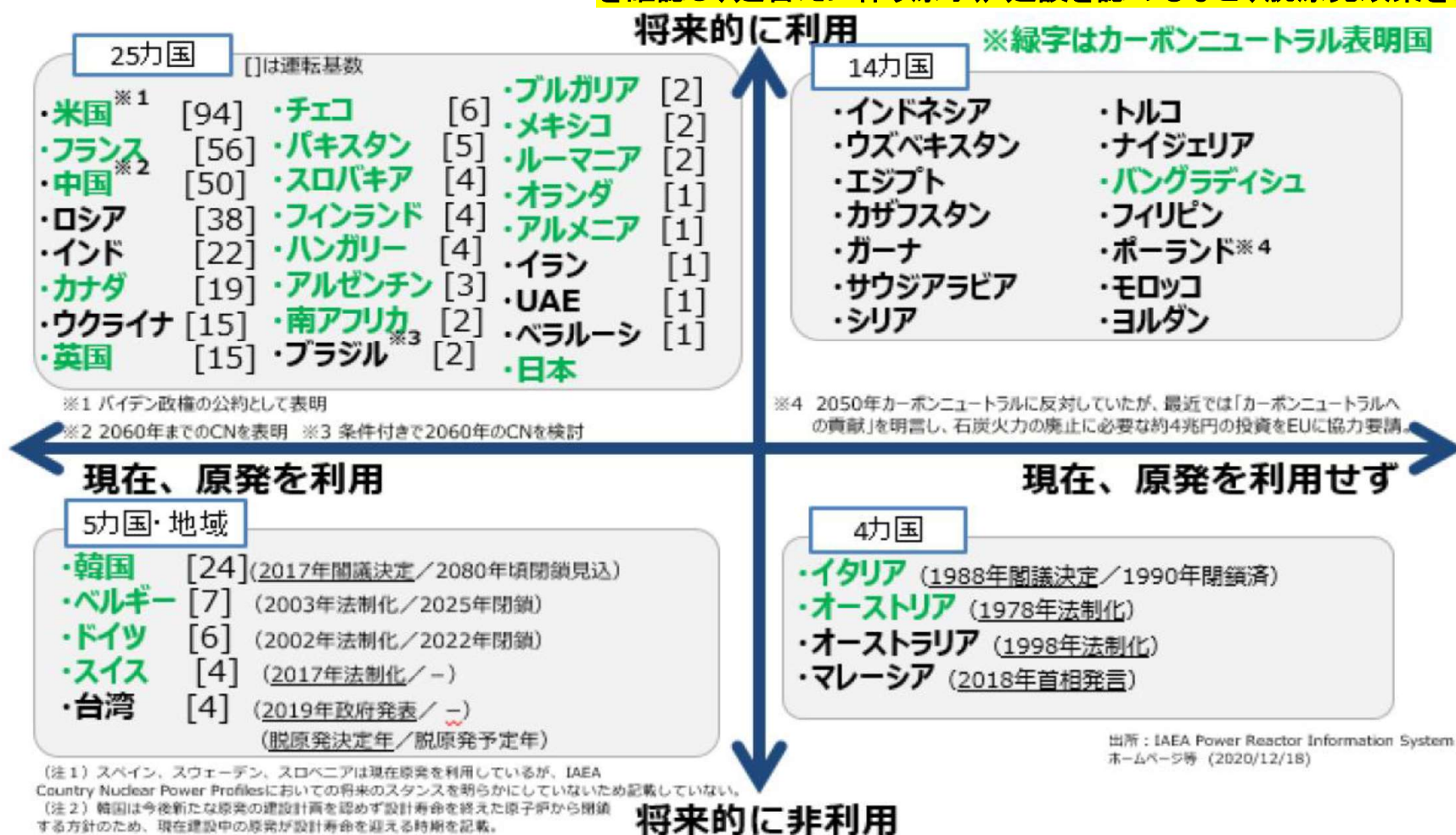
1) 本日の講演内容

- 1: 単純化沸騰水型原子炉 (SBWR): 開発の出発点から参画
米GE社 + 東芝 + 日立 + イタリア + インドネシアの国際PJ
→ 米GE日立社がSMR (BWRX300) 化
- 2: WH社のAP1000 (WHを東芝が買収したものの・・・)
- 3: 経済産業省の原子炉内蔵型制御棒駆動機構開発プロジェクト
→ これを三菱重工やWH社のSMRの開発初期に参考
- 4: 東芝の社内PJにて2000年からSMR (LSBWR) を開発
→ 当時 東芝が東工大と共同研究したものを現在 東工大
でさらに開発中)
5. NUSCALE社、フランスEDF英国ロールスロイス、露ロスアトム
6. 原子力推進宇宙船を北大時代に開発 (マイクロリアクター搭載)

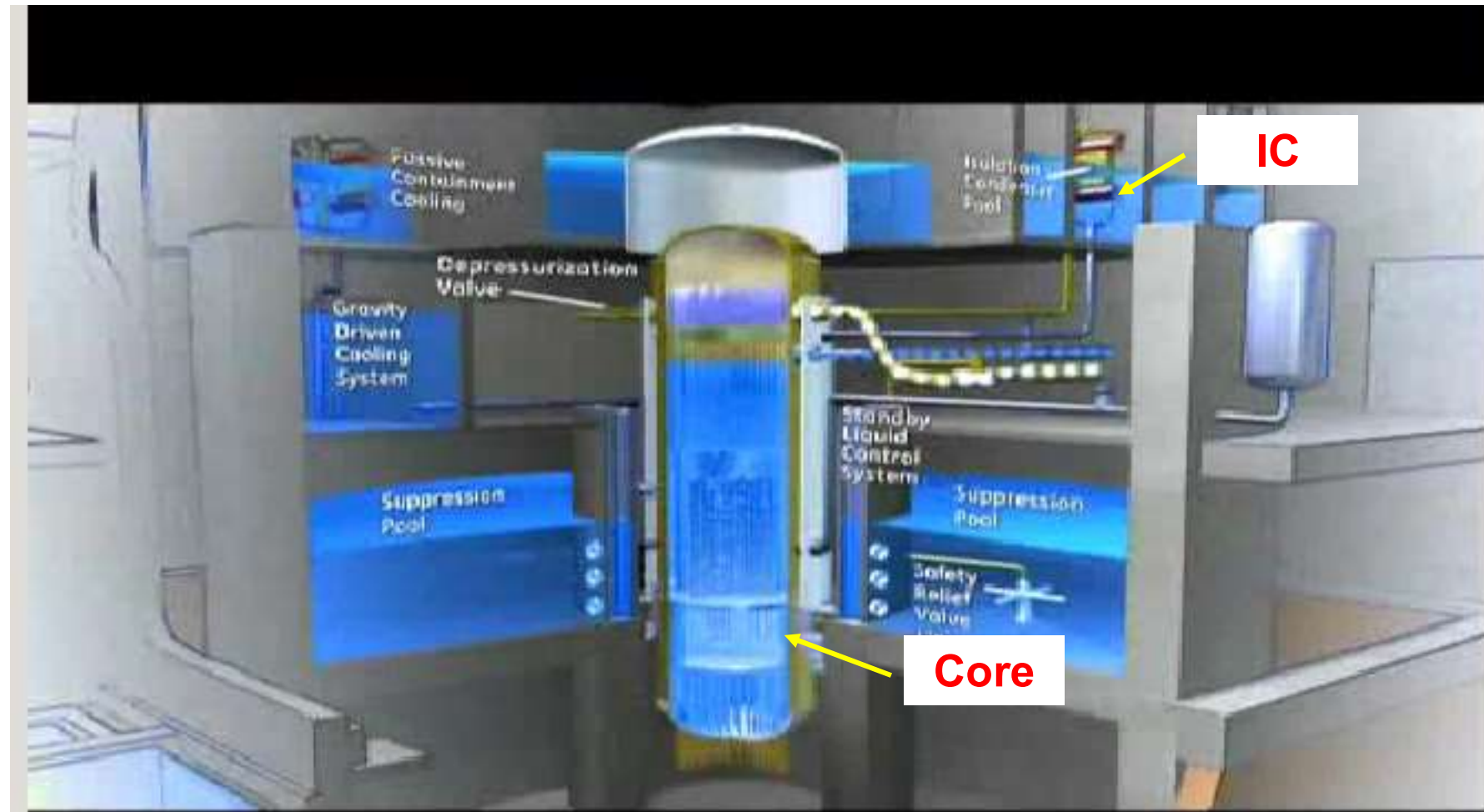
脱炭素と原子力活用、SMRは70のアイディア

- ◆ カーボンニュートラルを目指す国の中には原発を将来にわたって活用する国が多数含まれる。
- ◆ 脱原発は国際的潮流ではない

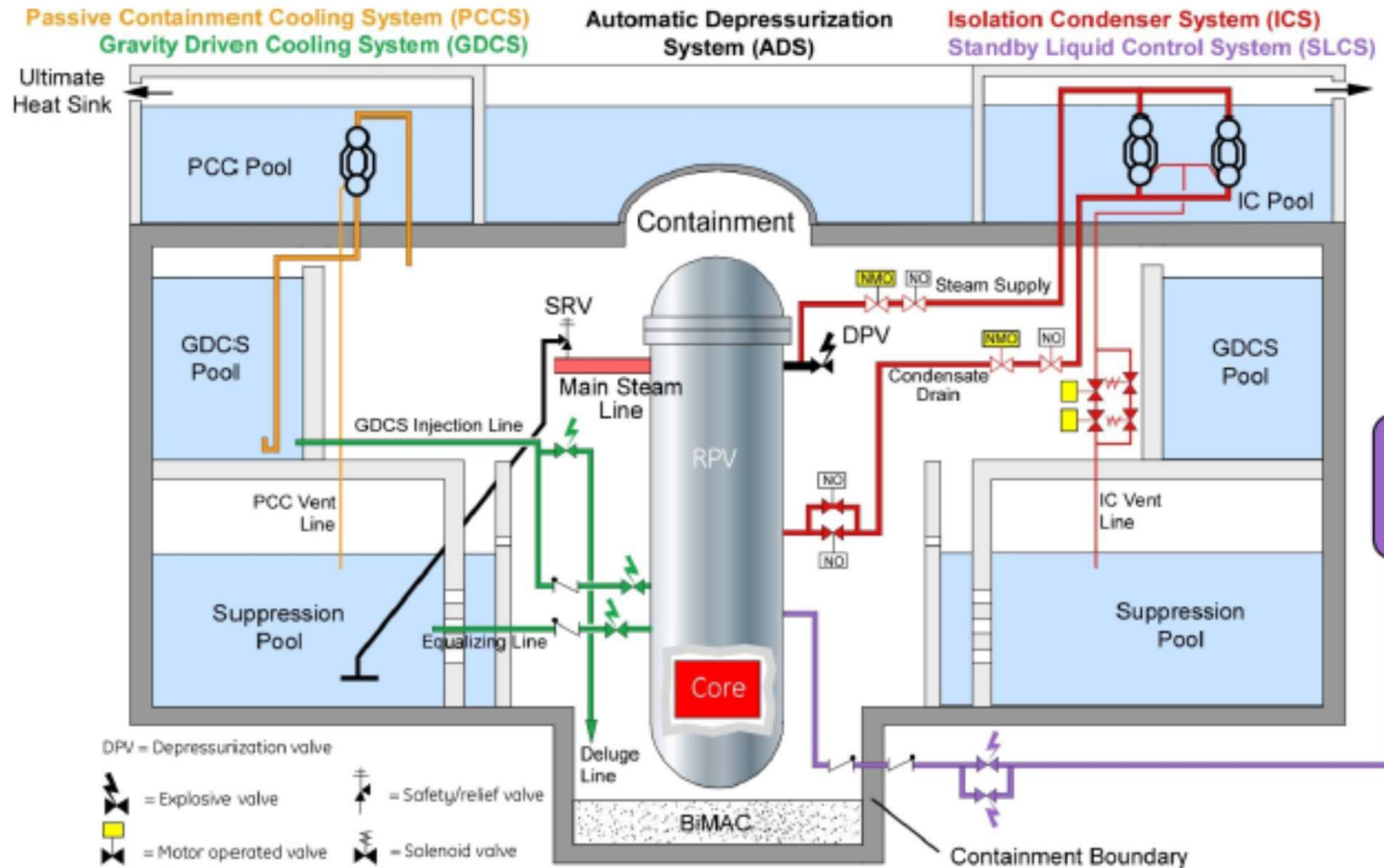
◆スウェーデン政府は1980年に国民投票で決定した脱原発政策を見直し、2010年の国民投票で、脱原子力見直しに関する法律の有効性を確認し、建替えに伴う原子炉建設を認めるなど、脱原発政策を破棄



高経済性単純化BWR(ESBWR)

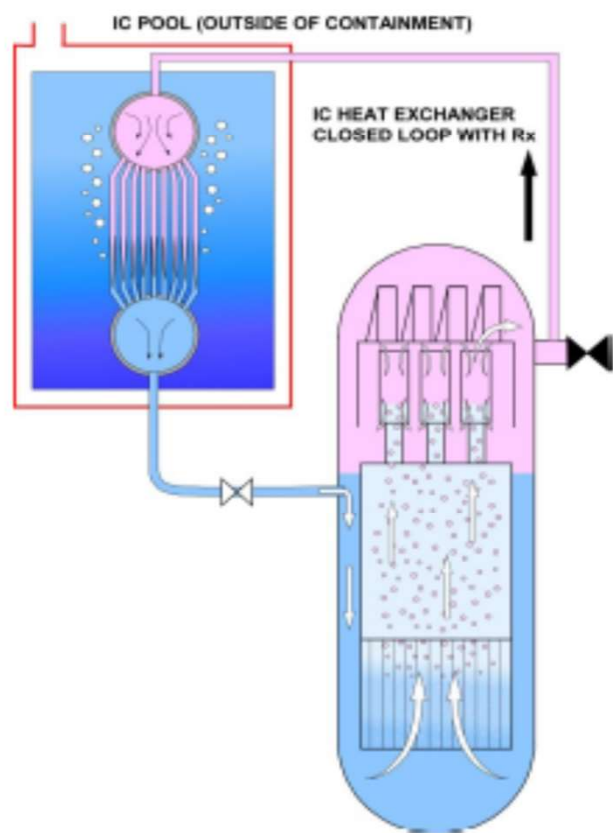


ESBWRの静的安全系

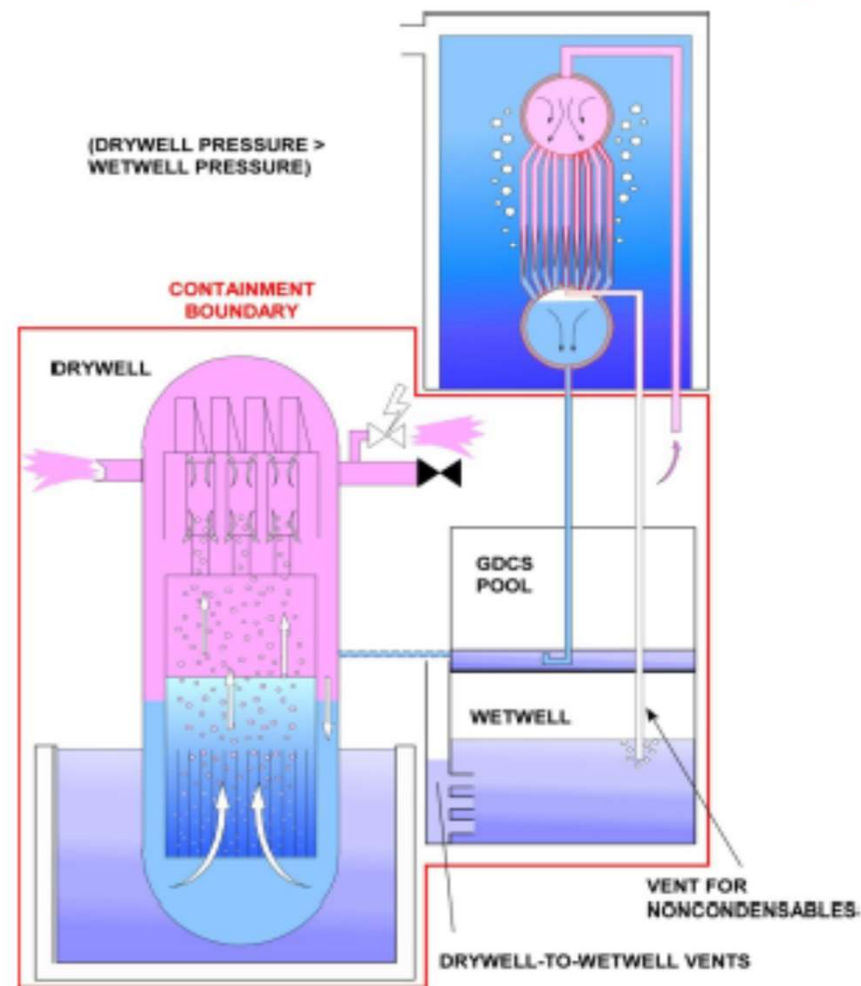


静的炉心冷却系 (IC) と静的格納容器冷却系 (PCCS)

Isolation Condenser System

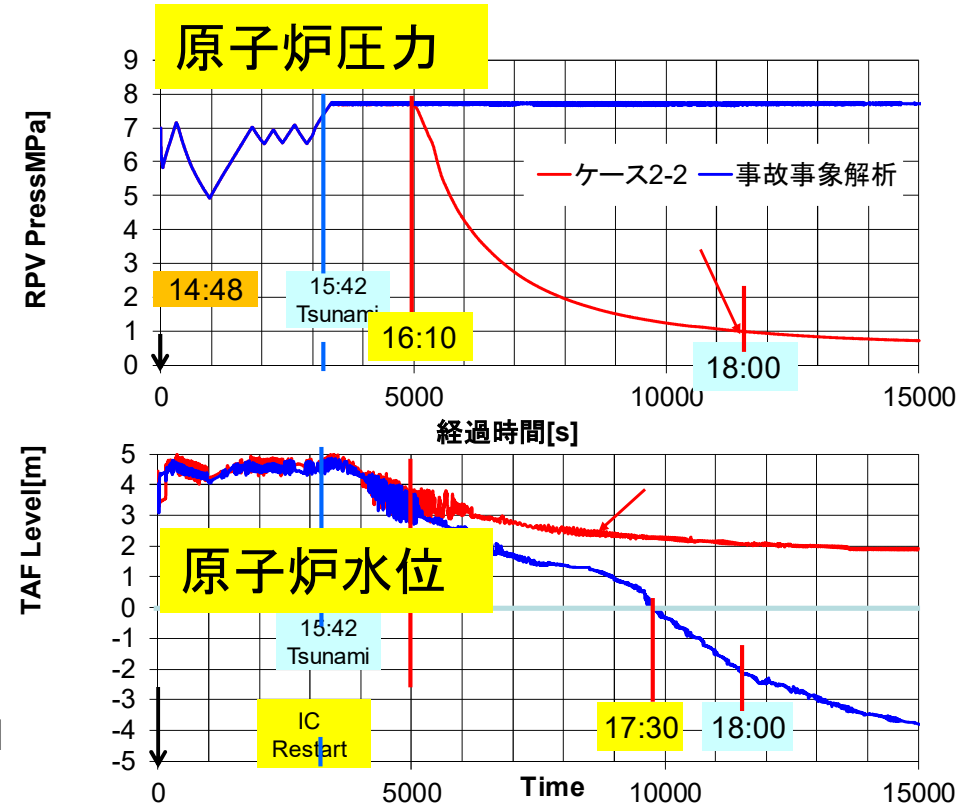
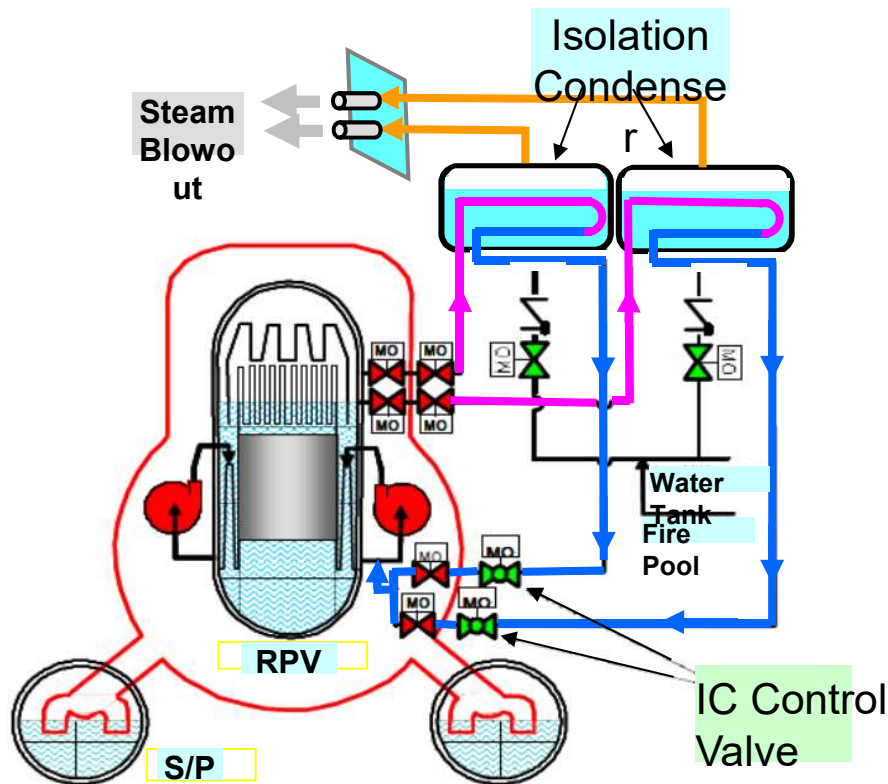


Passive Containment Cooling



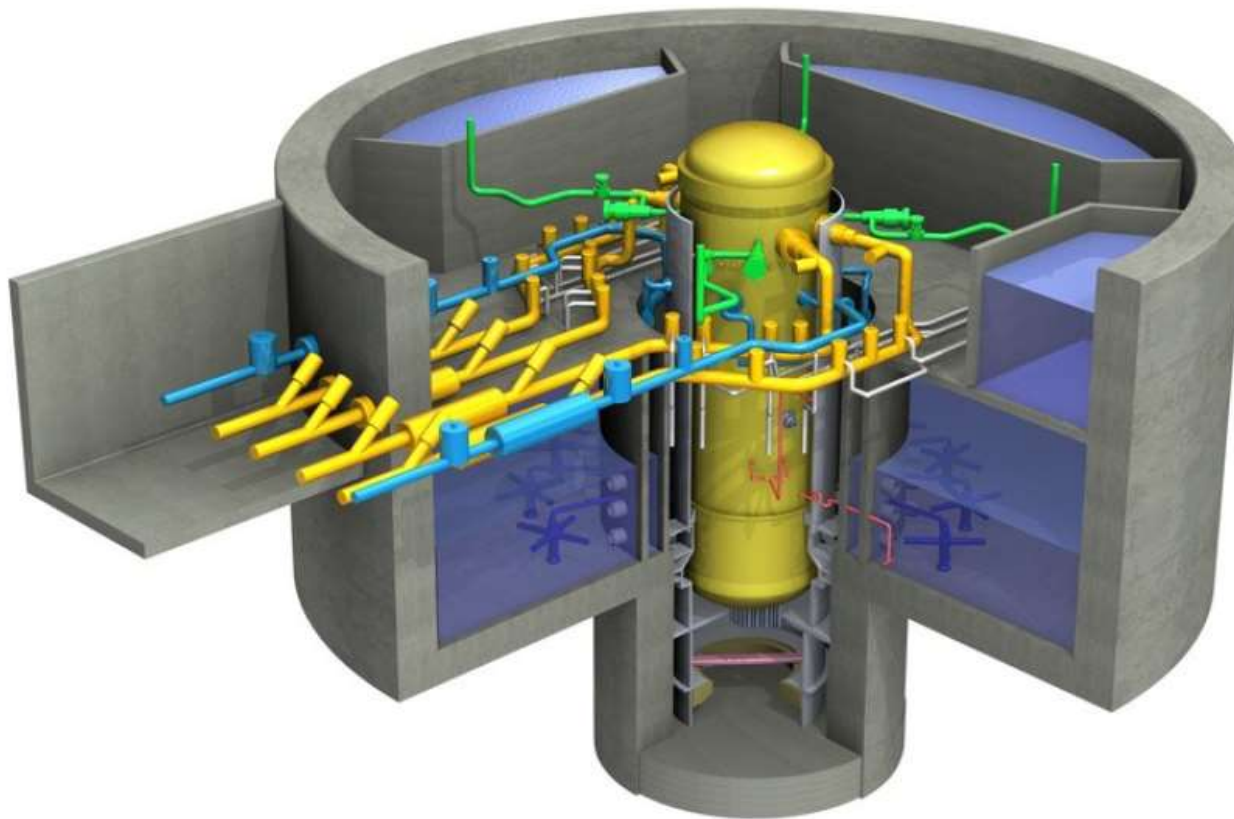
福島第一原発のICを作動継続していれば

- 1号機の隔離時復水器 (Isolation Condenser) を作動継続していれば、1号機は安全停止できた。
- 冷えすぎたために、運転員が1基作動停止し、残りの1基をオンオフ運転していて、作動停止(オフ)したときに津波が来襲
- 18:00に運転員が気づいて再起動したときには、時すでに遅し。



ESBWRの原子炉と冷却水プール

ESBWR: Economic Simplified Boiling Water Reactor (Developed by Hitach-GE)



Natural circulation to
provide flow to reactor
core

Passive safety features

Gravity driven ECCS

Gravity driven PCCS

2) 先進原子力プラント炉国際会議 での小型モジュール炉 (SMR)

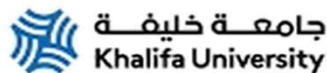


ICAPP 2021

2021 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants

October 16-20, 2021 | Khalifa University, Abu Dhabi, UAE

Hosted by



Platinum Sponsor



Silver Sponsor



VIRTUAL
EVENT



www.icapp2021.org

LIVE

先進原子炉国際会議 (ICAPP 2021)



Safety Measures Strengthened by the Role of Japanese Nuclear Power Plants Toward Carbon Neutrality in 2050 and the Lessons Learned from the Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

Tadashi NARABAYASHI
Professor, Tokyo Institute of Technology



Opening Remarks

Arif Sultan AL HAMMADI
Executive Vice President, Khalifa University

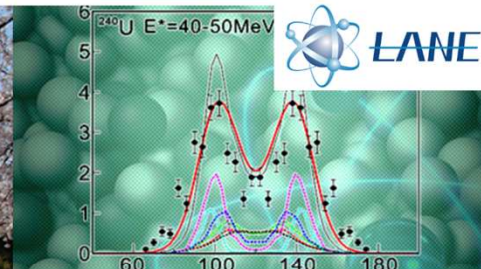


Chair

Sama Bilbao y LEON
Director General, Leadership
World Nuclear Association (WNA), United Kingdom

11:00-14:05 Plenary III "Integrated Energy Systems:
How Nuclear, Renewables and Clean Hydrocarbons can Work Together to Mitigate Climate Changes"
October 19, Abu Dhabi, ICAPP 2021

The Role of Japanese Nuclear Power Plants Toward Carbon Neutrality in 2050 and the Lessons Learned from the Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant



12:05-12:35 October 19 (Tuesday)

Dr. Tadashi NARABAYASHI

Professor,

Laboratory for **Zero-Carbon Energy**,
Tokyo Institute of Technology (Tokyo Tech)



米国GH日立社のSMR: BWRX300 (30万kW)



ICAPP 2021
2021 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants
October 16-20, 2021 | Khalifa University, Abu Dhabi, UAE

Hosted by
جامعة خليفة
Khalifa University

Platinum Sponsor
مؤسسة الإمارات للطاقة النووية
Emirates Nuclear Energy Corporation

Silver Sponsor
FANR
FNC Technology Co., Ltd.

www.icapp2021.org




GE HITACHI

**BWRX-300:
Pathway to Low Cost
SMRs**

ICAPP 2021 | October 18, 2021



SMRの代表例：米NUSCALE社



Benefits Technology Projects Environment Investors About Us

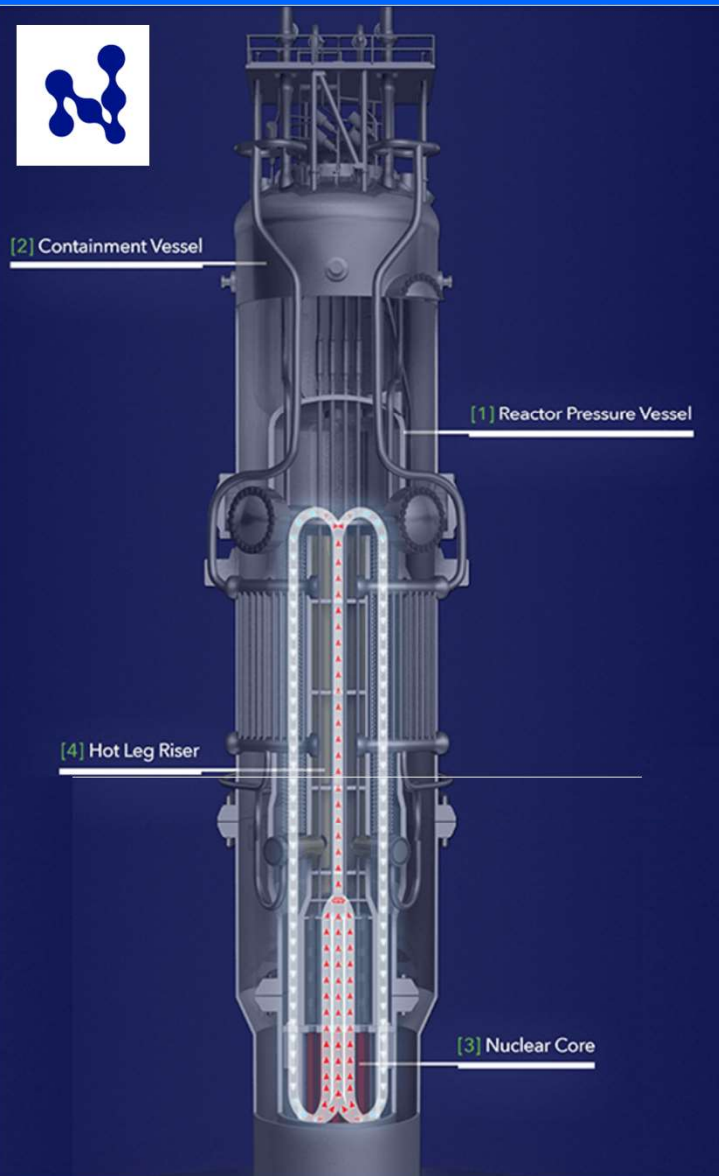
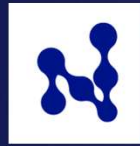


12-Module (924 MWe)	6-Module (462 MWe)	4-Module (308 MWe)
VOYGR™-12	VOYGR™-6	VOYGR™-4



<https://www.nuscalepower.com/projects>

米国NUSCALEの原子炉本体



FEATURES OF THE NUSCALE POWER MODULE

自然循環による冷却材(水)の循環

CONDUCTION

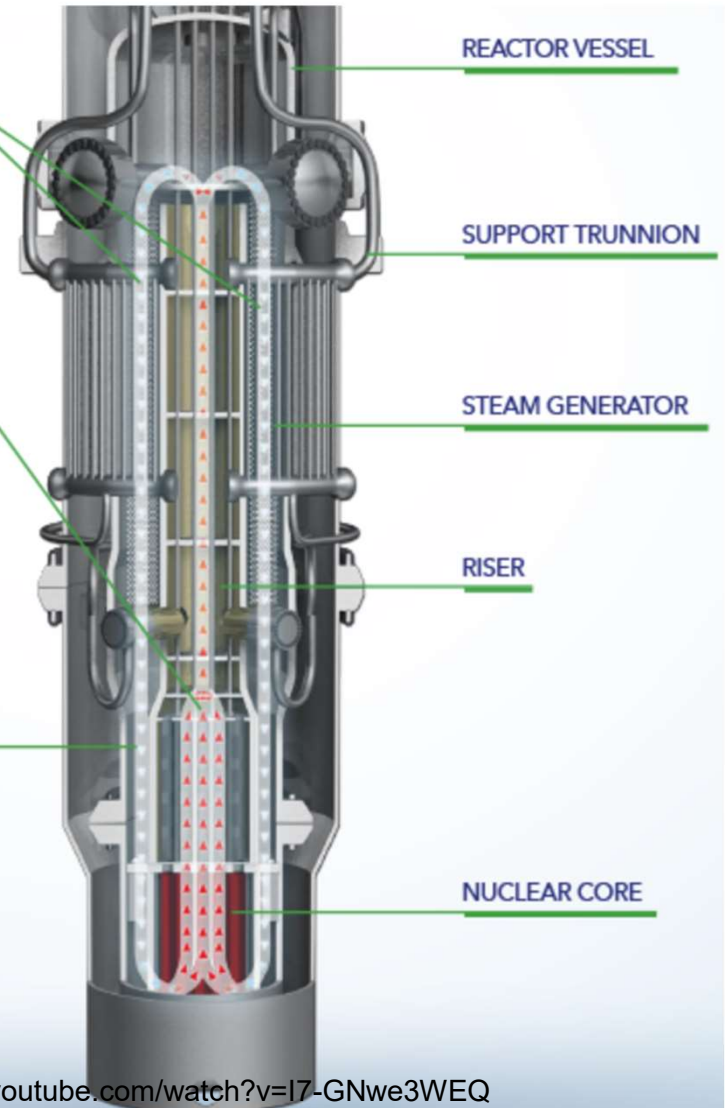
Heat is transferred from the primary coolant through the walls of the tubes in the steam generator, heating the water (secondary coolant) inside them to turn it to steam.

CONVECTION

Energy from nuclear reaction heats the primary reactor coolant causing it to rise by convection and natural buoyancy through the riser, much like a chimney effect.

GRAVITY

Colder (denser) primary coolant "falls" to bottom of reactor pressure vessel, cycle continues.



<https://www.youtube.com/watch?v=I7-GNwe3WEQ>

英国ロールス・ロイス社のSMR



Rolls-Royce SMR is a completely different way of building nuclear; factory fabricated, road transported and site assembled.

The RR SMR approach is a holistic, integrated power station and not just a nuclear reactor design.

~470 MWe output

50 Hz design

Proven PWR Technology & Standard Fuel

Power station delivery as a turnkey project

4 yr Construction (Nth unit)



Enhanced Gen III+ levels of safety and security

1st unit on grid early 2030s

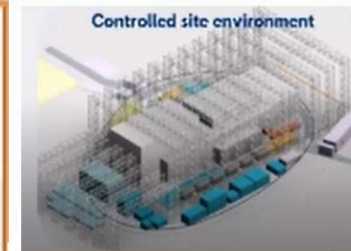
Capital cost under £1.8 Bn*

Adaptable, multi-use power & heat output

LCOE £35-£50 per MWh*

Rolls Royce SMRs – Low cost, Deliverable, Investable Low Carbon Power

8 Non-Confidential
© 2021 Rolls-Royce | Not Subject to Export Control



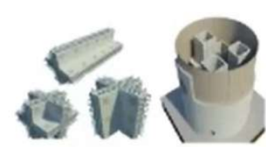
Primary modules



MEP modules



Civil modules



Alan WOODS

Director
Strategy and Business Development - SMR
Rolls-Royce plc.
United Kingdom



Rolls-Royce SMR

Economic potential and marketability

Alan Woods – Director Strategy & Business Development



The information in this document is proprietary and confidential to Rolls-Royce and is available to authorized recipients only. Copying and/or unauthorized distribution is prohibited other than for the purposes for which it was made available.

Photo: Generically Simulated © 2021 Rolls-Royce plc. All rights reserved.



露口スアトム社のSMR (55万kW × 2基)

2 × 55 MWe – 110 MWe

2 RITM-200N reactors Modularity available

TECHNICAL PARAMETERS

Electrical capacity	>110 MW (2 x 55 MW)
Thermal capacity	380 MW (2 x 190 MW)
Refueling cycle	5-6 years
Design life	60 years
Availability factor	90%
Plant area	15 acres (0.06 km ²)
Construction period	3 - 4 years



FLEXIBLE, TAILOR-MADE SMALL NPP SOLUTION
BASED ON RITM SMR IS DESIGNED TO ADDRESS A
WIDE RANGE OF CUSTOMER DEMANDS



Displacement	21 000 t
Length	140 m
Beam	30 m
Draught	5.6 m
Fuel cycle	3 years
Design life	40 years
Time to maintenance	12 years
Staff	299*

ROSATOM SMR evolution: from KLT-40S to RITM-200



Time proven PWR technology

Integral configuration

3+ generation

45% less in the dimensions, 35% less in mass*

>400

reactor-years of
successful operation of
small reactors on
icebreakers



ROSATOM: all that is nuclear



ROSATOM - unique experience and capabilities in the global energy market

35 NPP UNITS in overseas portfolio

255 000 EMPLOYEES

>300 ENTERPRISES AND ORGANIZATIONS

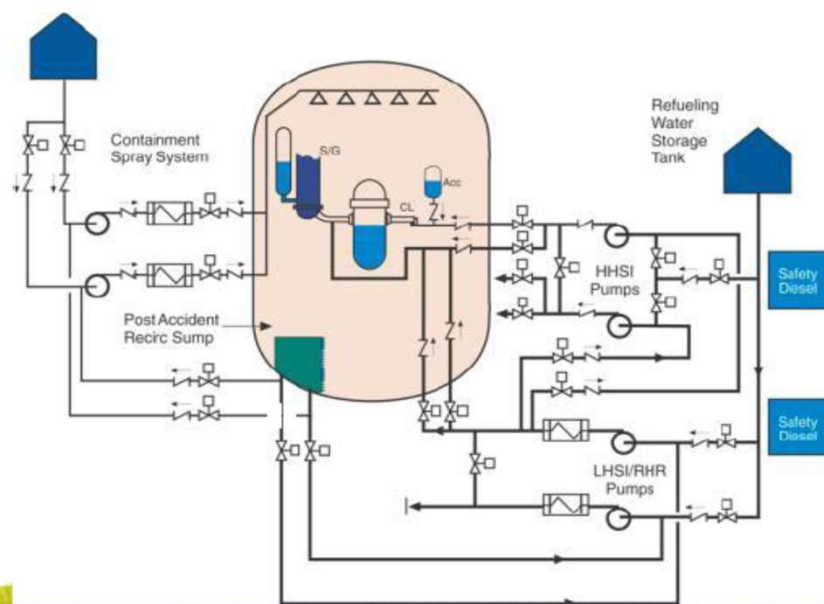
>50 COUNTRIES of business around the globe



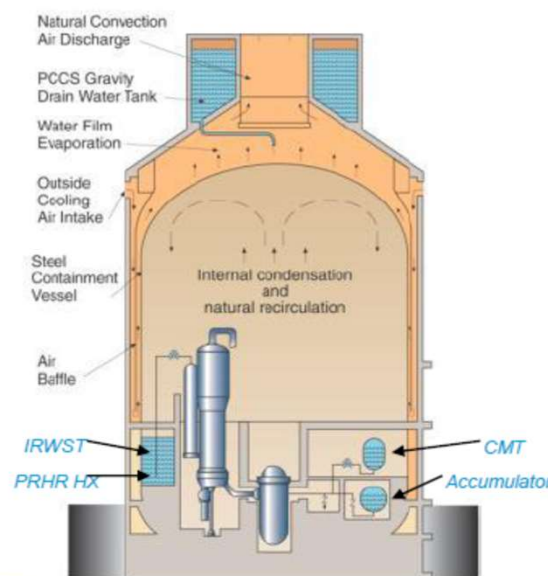
3) 静的安全系 (Passive Safety) による簡素化・安全性・信頼性の向上

- Simplification of safety systems eliminate the need for AC power
- Dramatically reduces building volumes

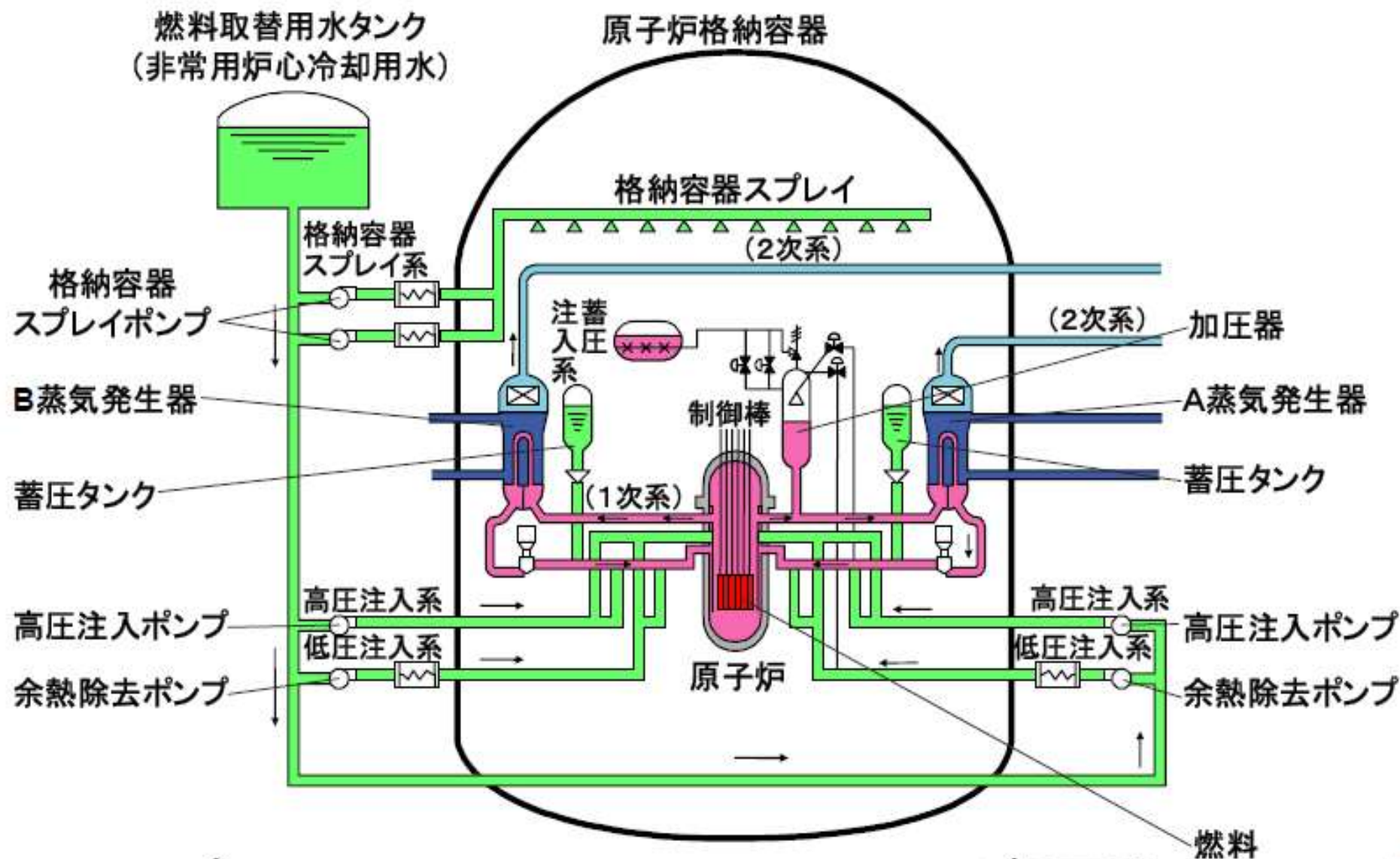
Standard PWR



AP1000



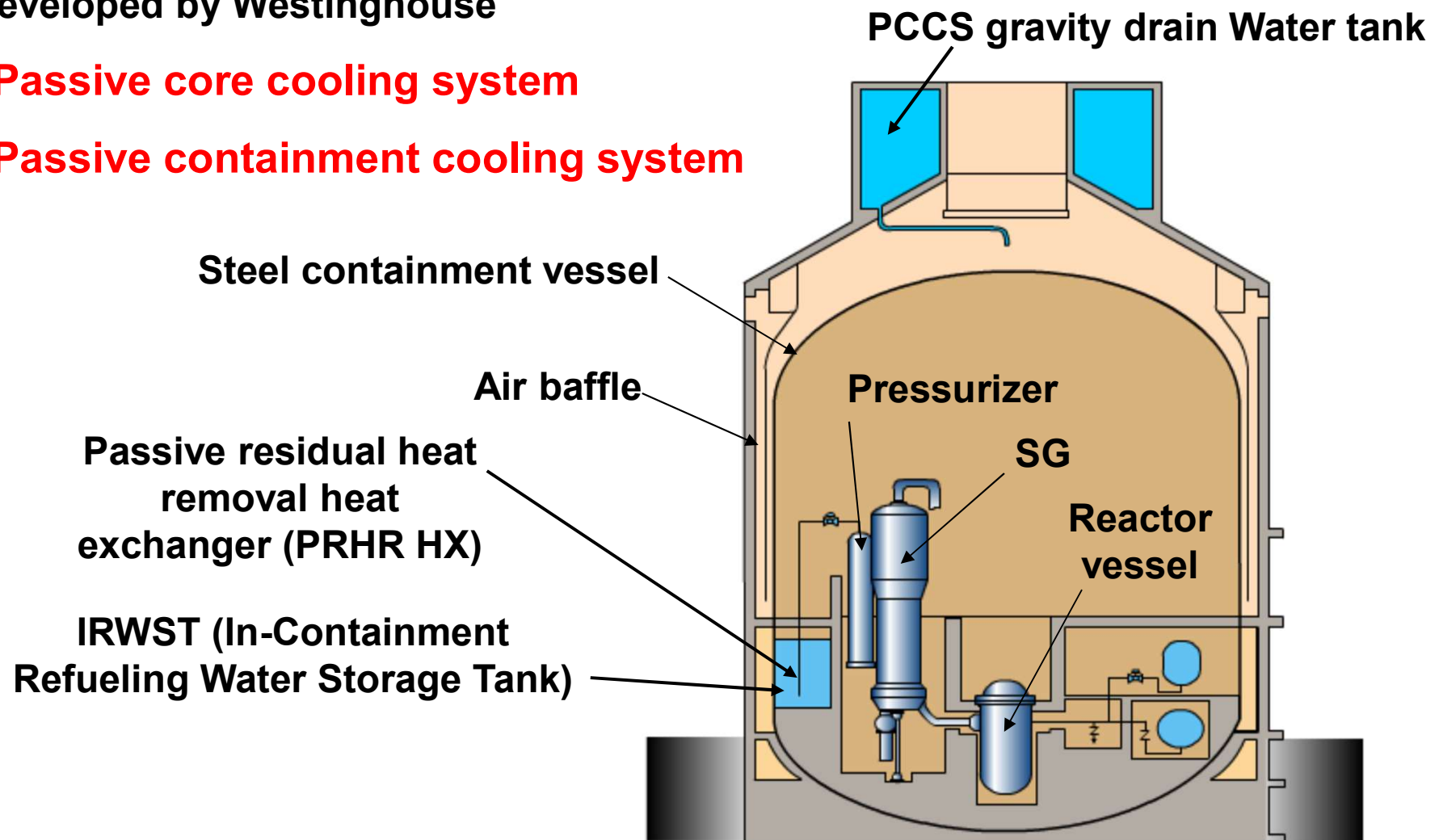
現行の加圧水型原子炉のECCS



WH社+TOSHIBA AP1000の静的安全系

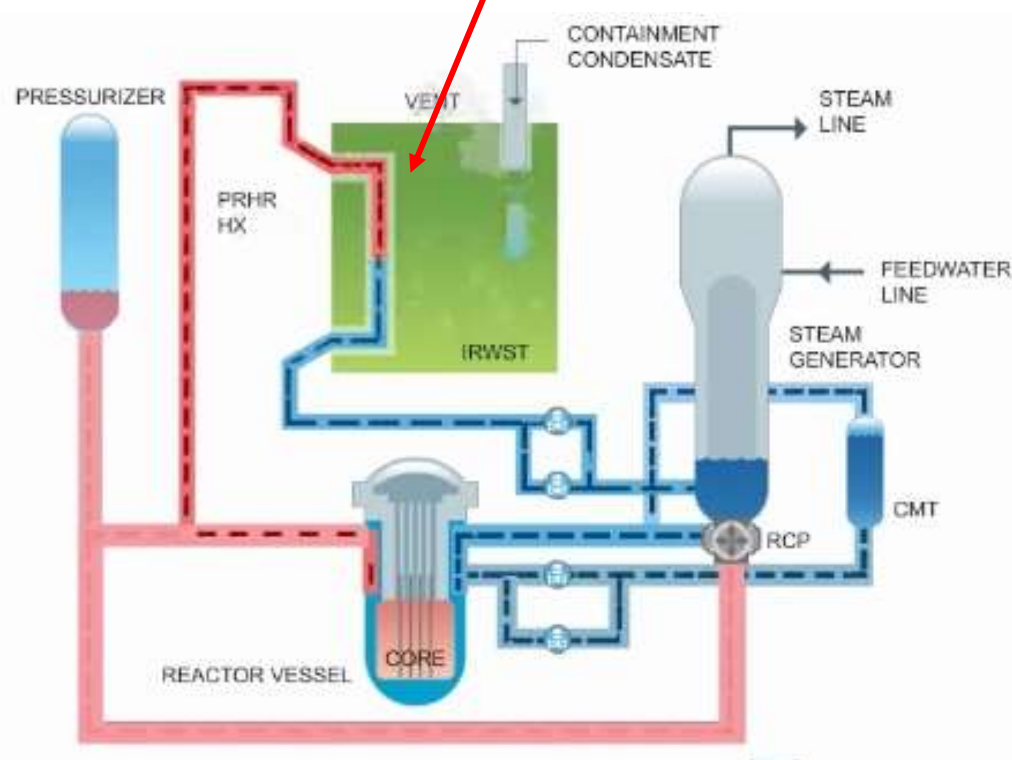
Developed by Westinghouse

- ・Passive core cooling system
- ・Passive containment cooling system

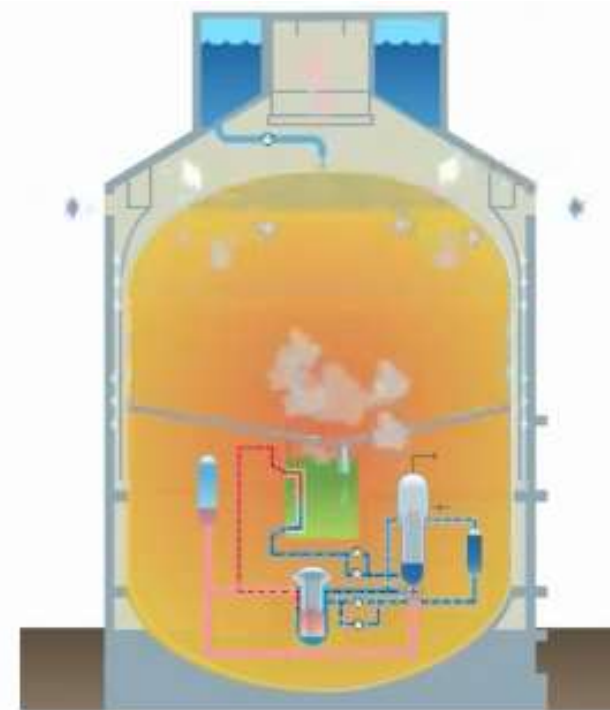


全電源喪失時の炉心と格納容器冷却

Passive residual heat removal
heat exchanger (PRHR HX)



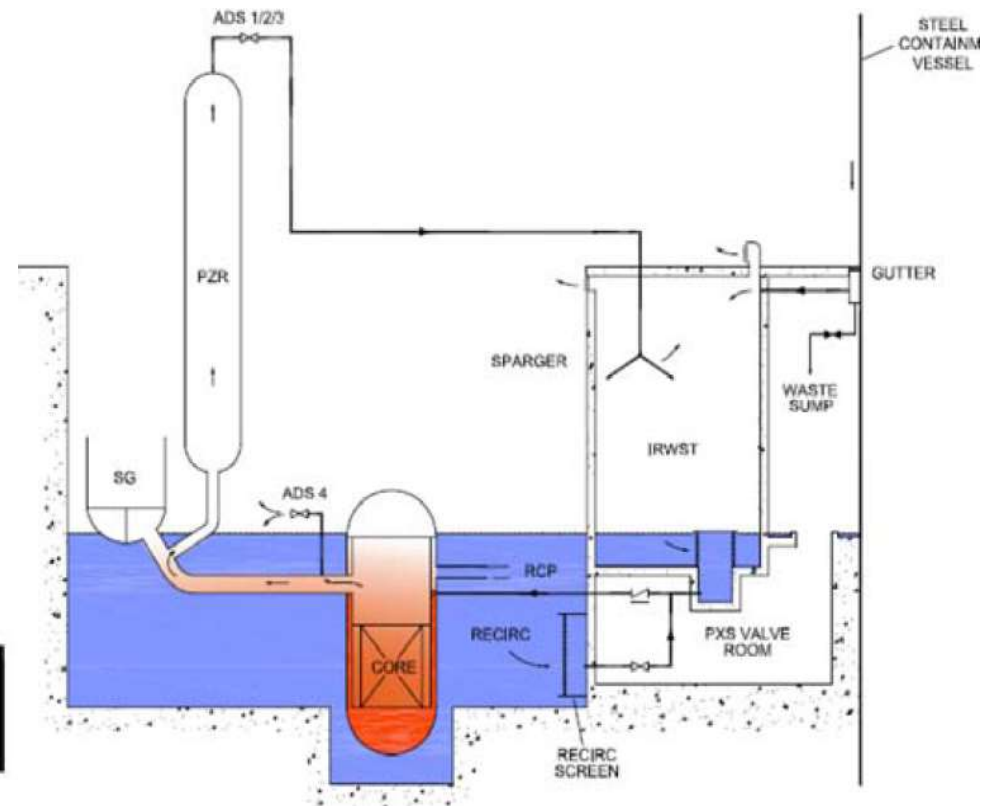
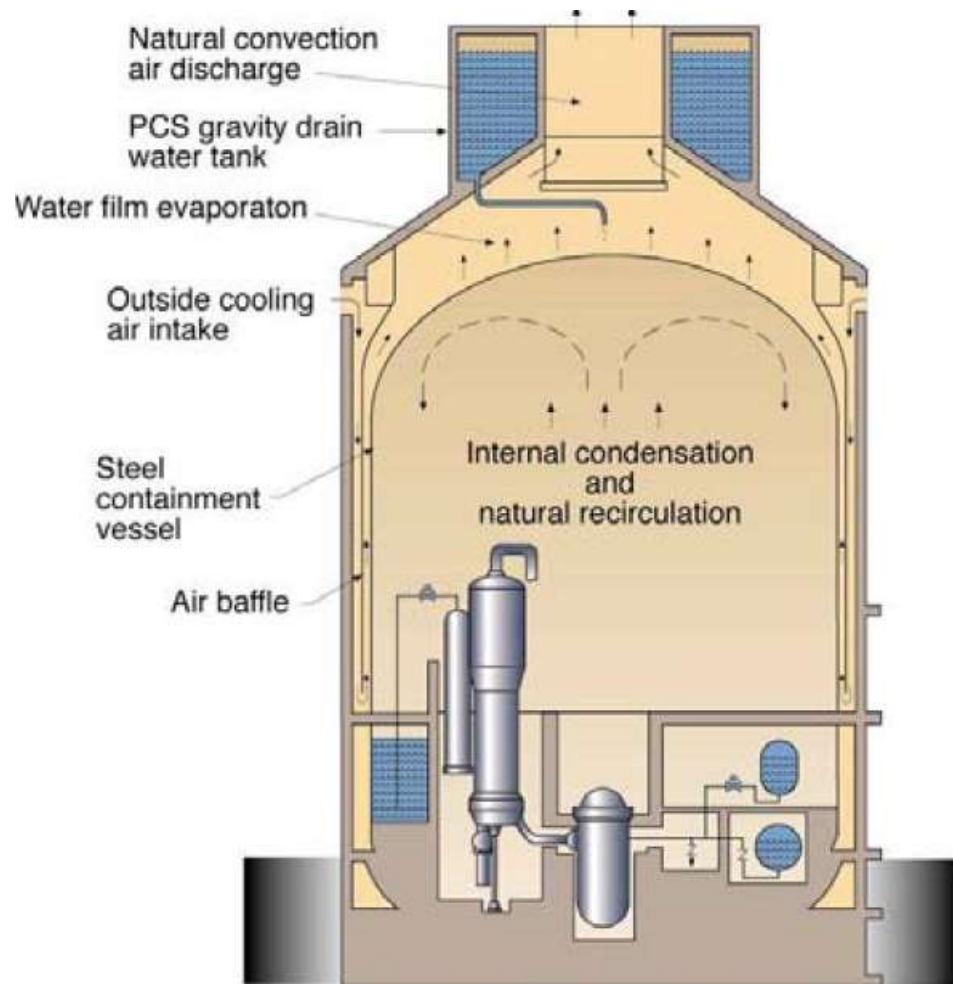
**Passive core cooling
system**



**Passive containment
cooling system**

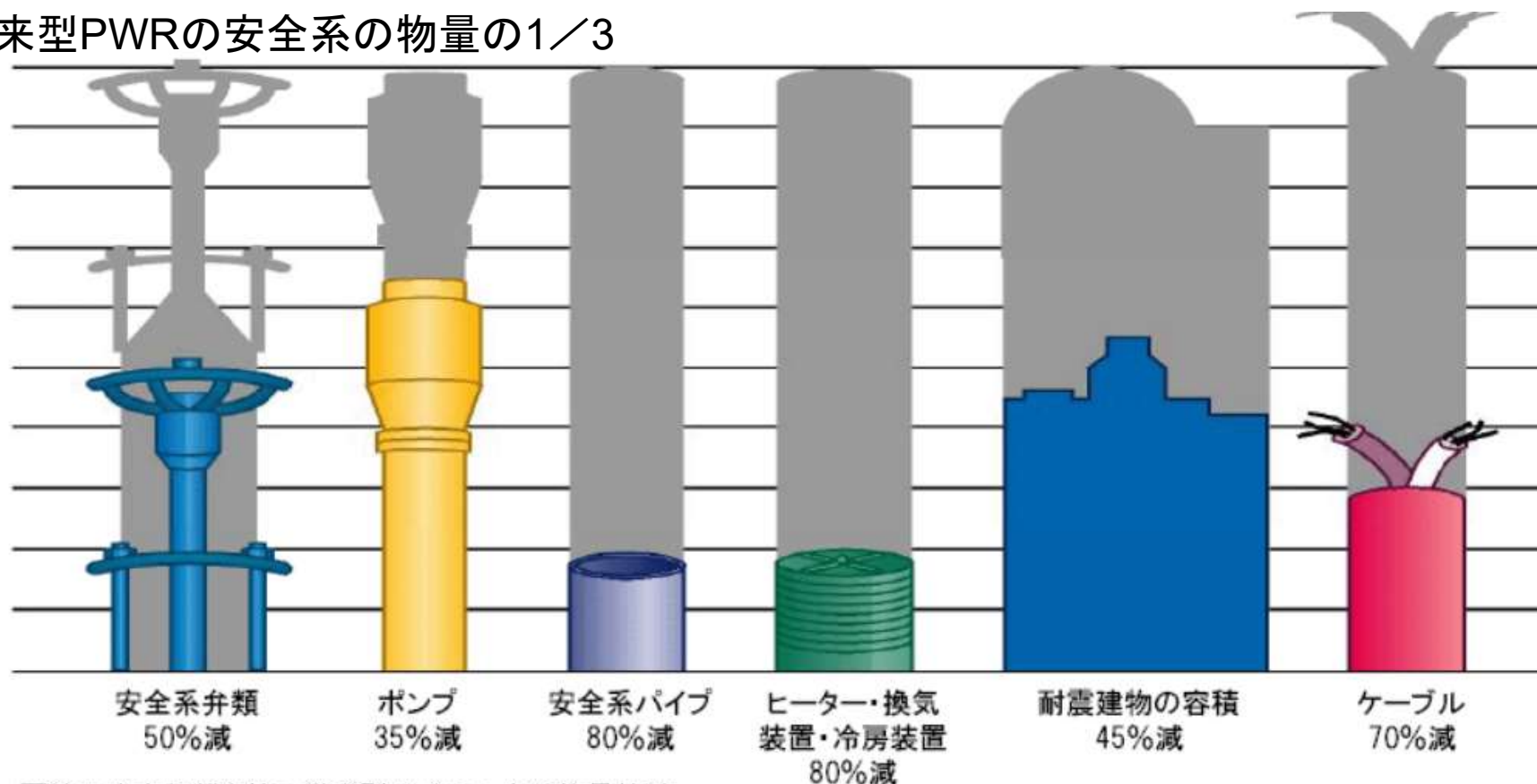
AP1000の自然冷却システム

■ 外部注水に頼らずに、自然冷却で事故収束



AP1000の安全系の大幅簡素化

従来型PWRの安全系の物量の1/3



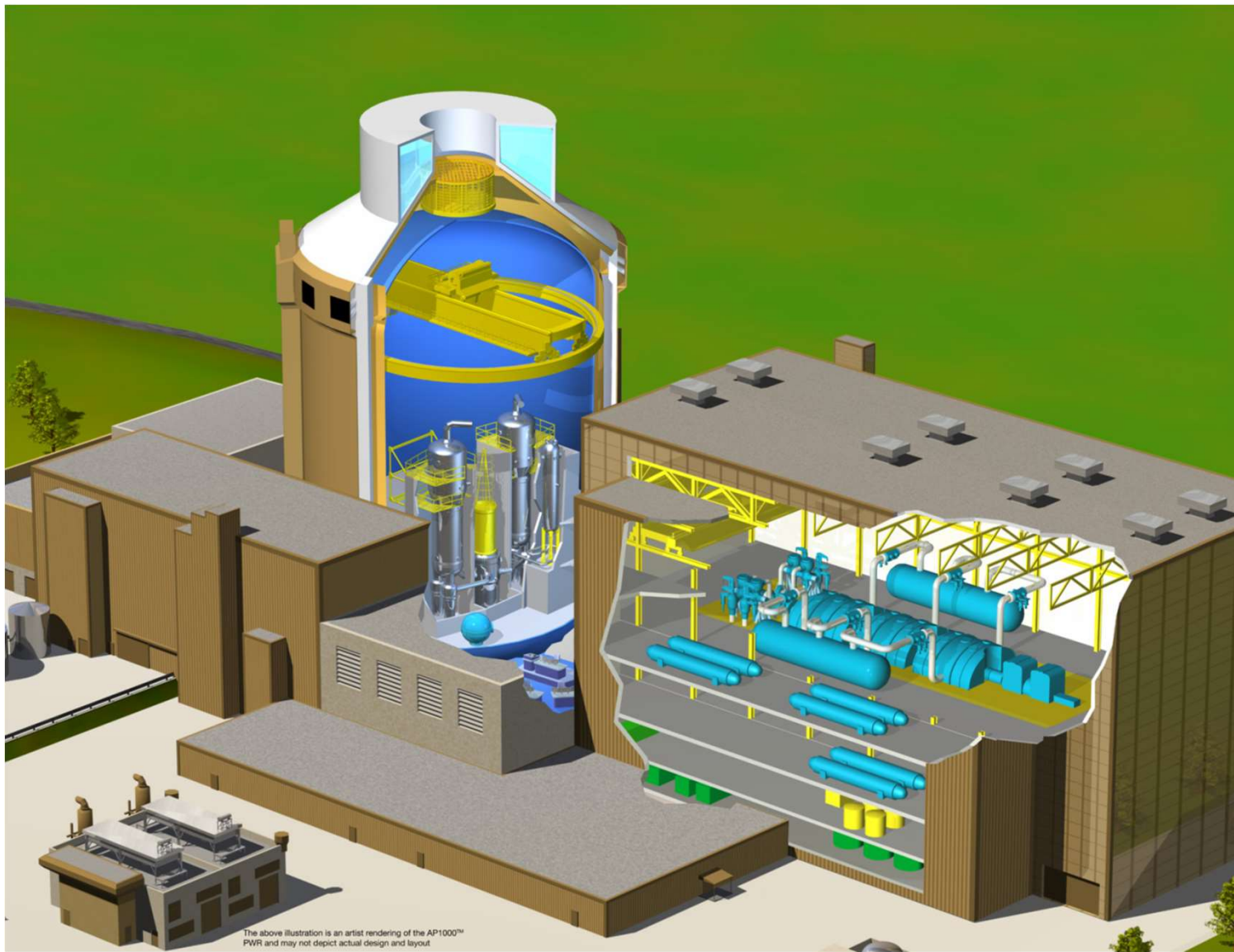
同等の出力規模を持つ従来型のプラントとの物量比較

下記の出所を基に作成した。

図7 AP1000の受動安全設計による機器類の物量低減

【出所】 R.A.Matzie: The AP1000 Reactor Nuclear Renaissance Option(September 26, 2003), 21/31,
http://www.eng.tulane.edu/FORUM_2003/Matzie%20Presentation.pdf

中国では4基運転、米国で建設中のAP1000



「ABWRとAP1000の世界展開」、特集:エネルギー技術の最前線」、日本機械学会誌(2011年4月号)231-233

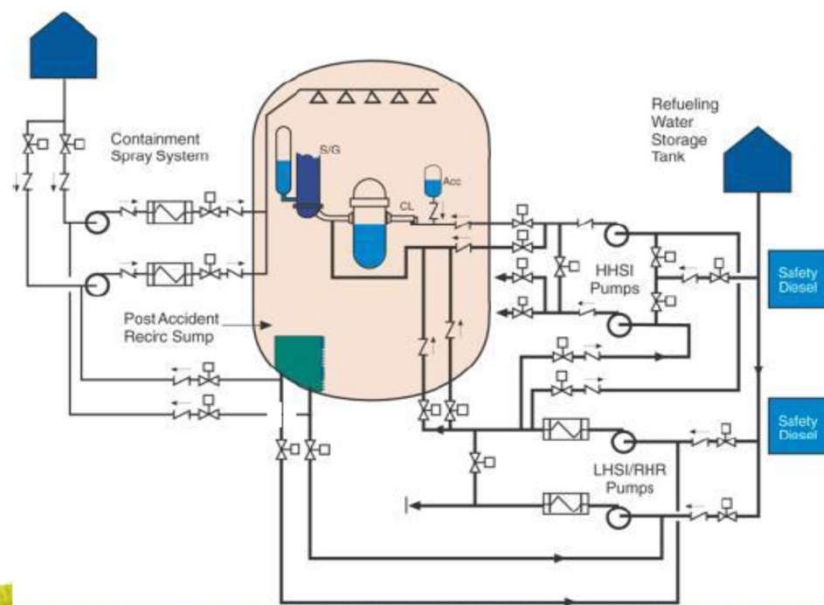
AP1000の建設(ボーグル3・4号)を視察



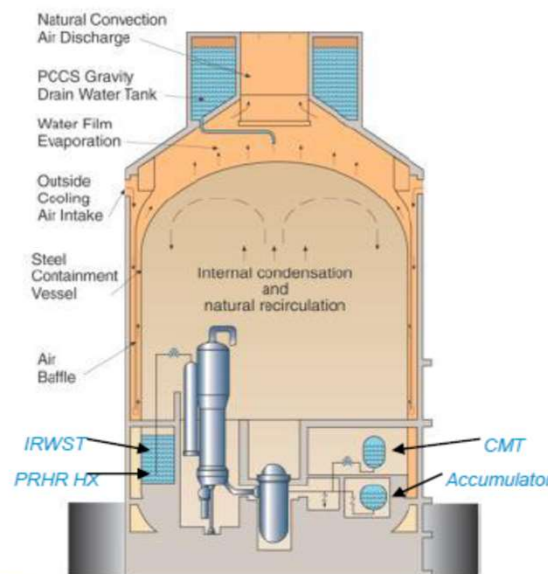
4) 内蔵制御棒駆動機構 (CRD) による 簡素化・安全性・信頼性の向上

- Simplification of safety systems eliminate the need for AC power
- Dramatically reduces building volumes

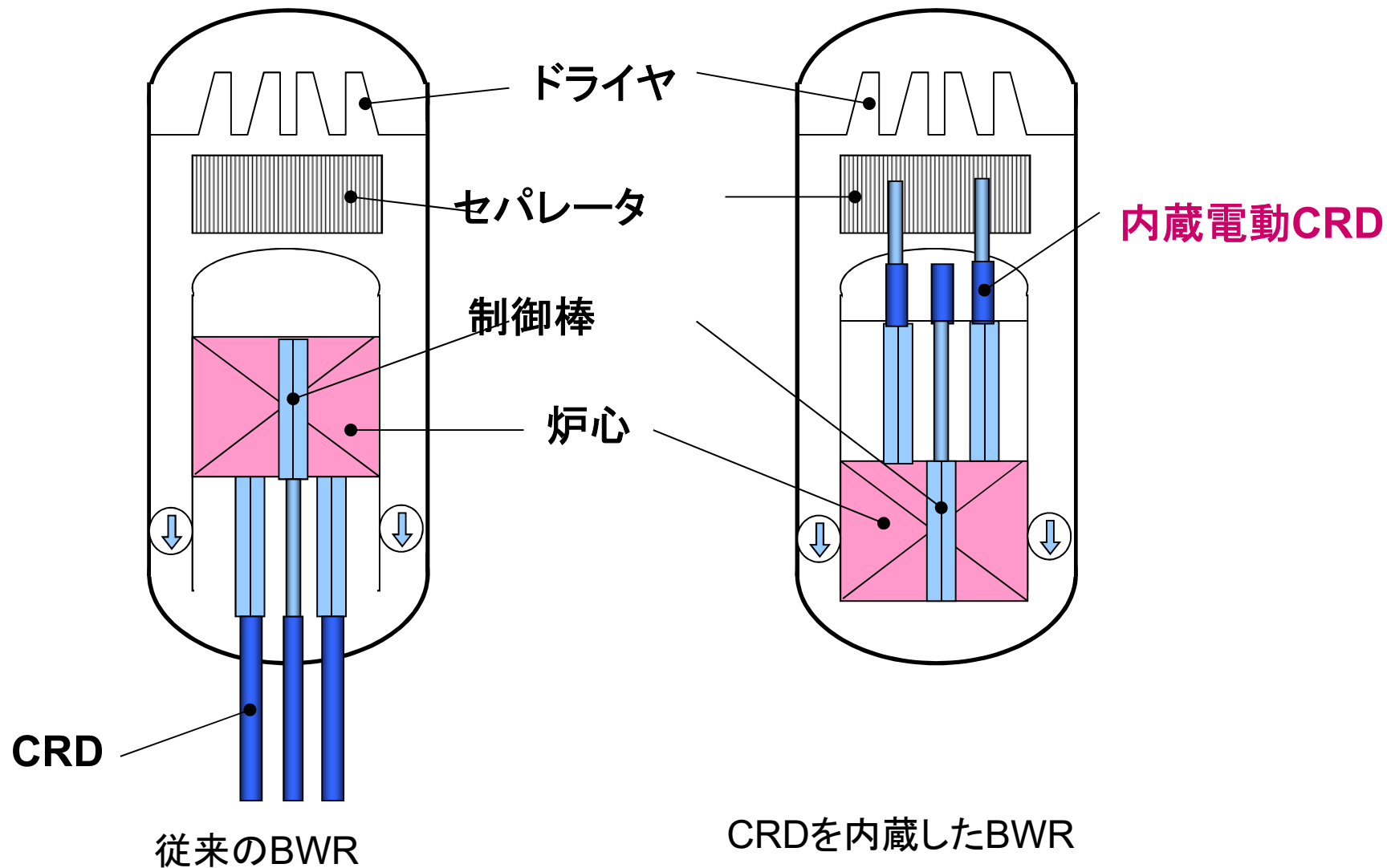
Standard PWR



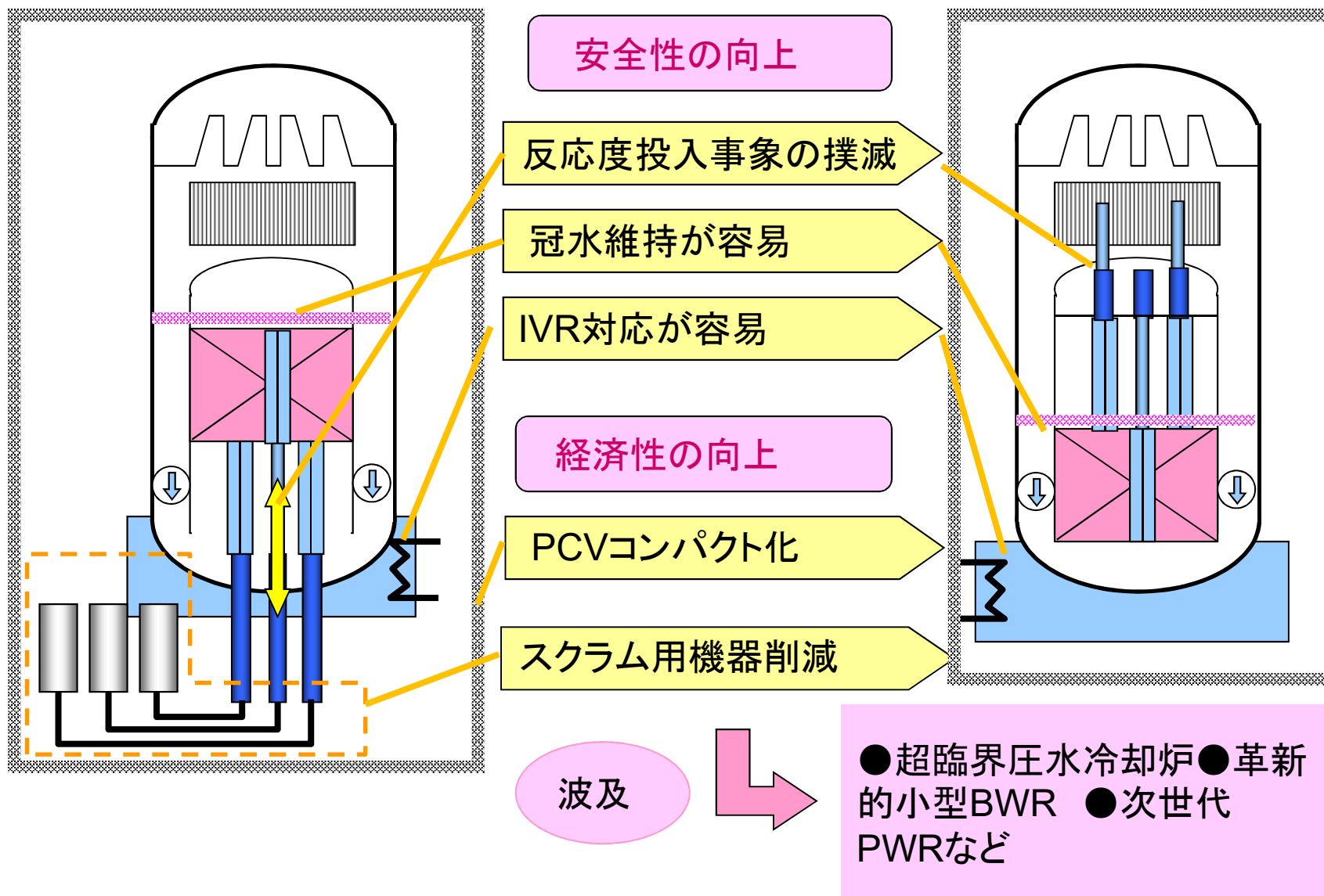
AP1000



経済産業省PJ: 内蔵電動CRDによるBWRの大幅な簡素化

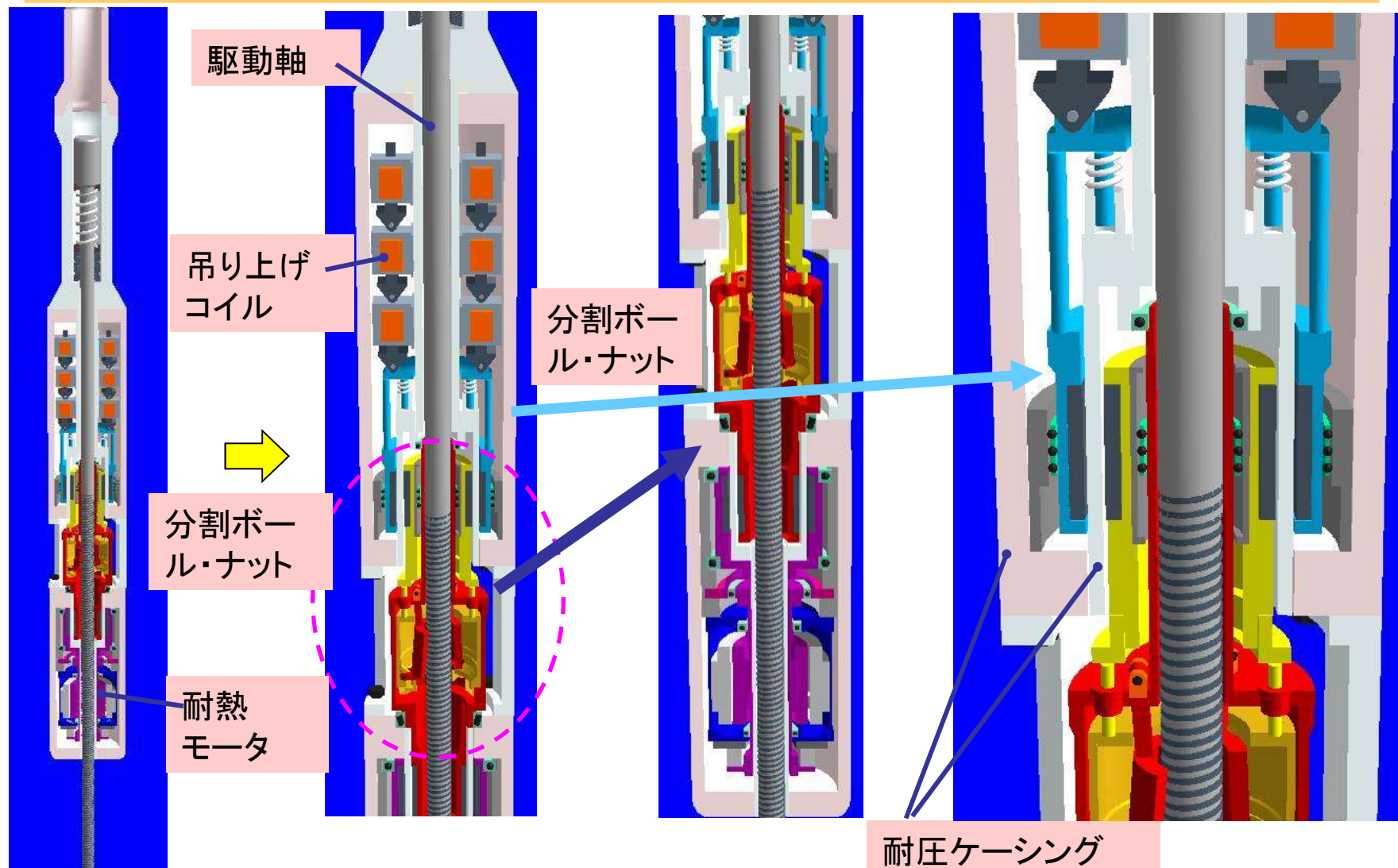


内蔵電動CRDのメリットと波及効果

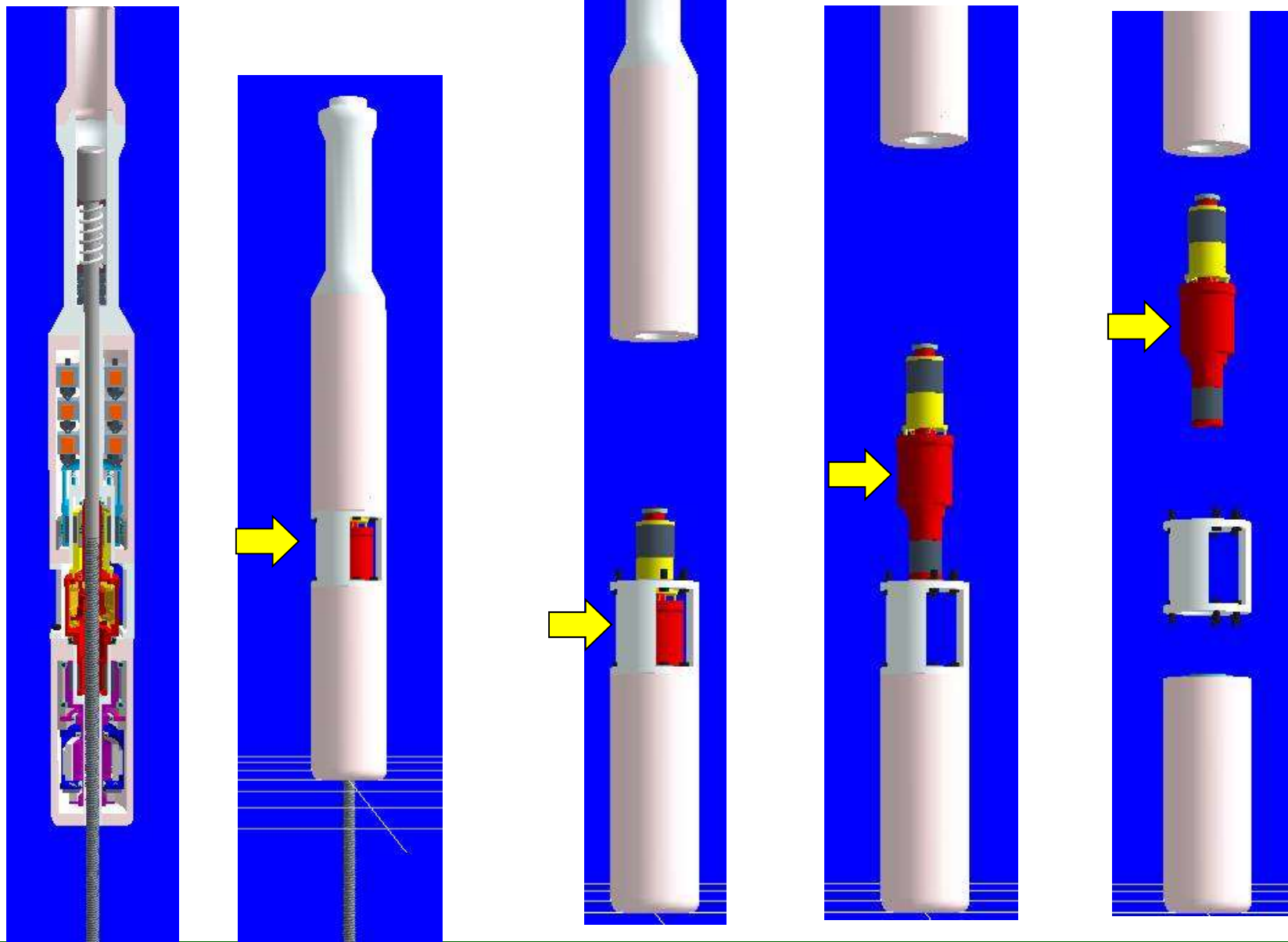


内蔵CRD駆動機構の3D-CAD設計

スクラム機構の作動原理確認→実機駆動機構の設計・製作

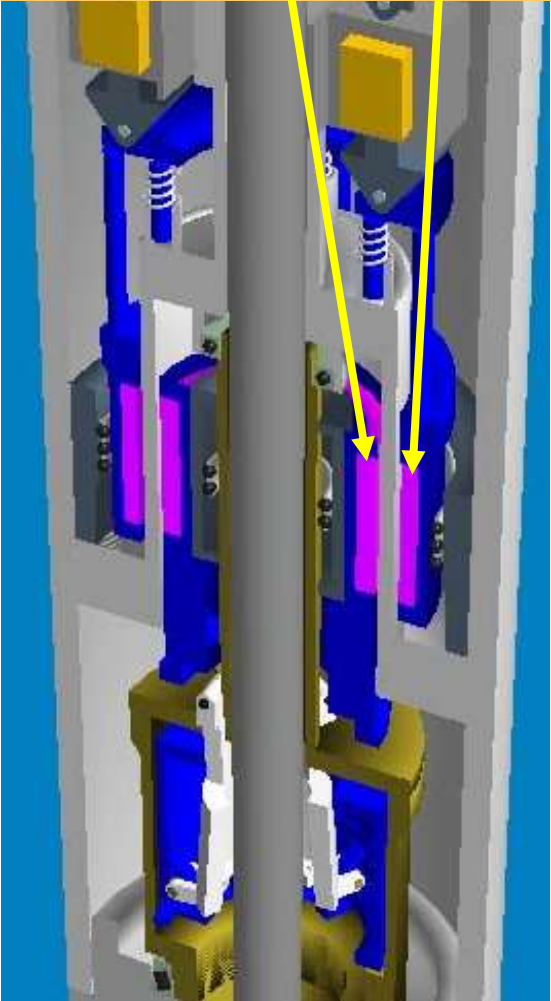


内蔵CRD駆動機構の分解点検



内蔵CRDが完成(耐熱モータも開発)

耐圧キャン壁を挟んで
磁力により駆動力伝達



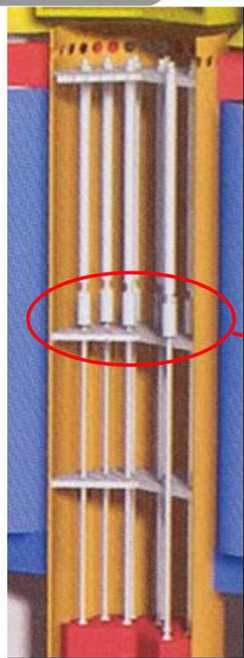
耐圧キャン完全密封構造
が可能となった



内蔵CRDをWH社グループから講演依頼

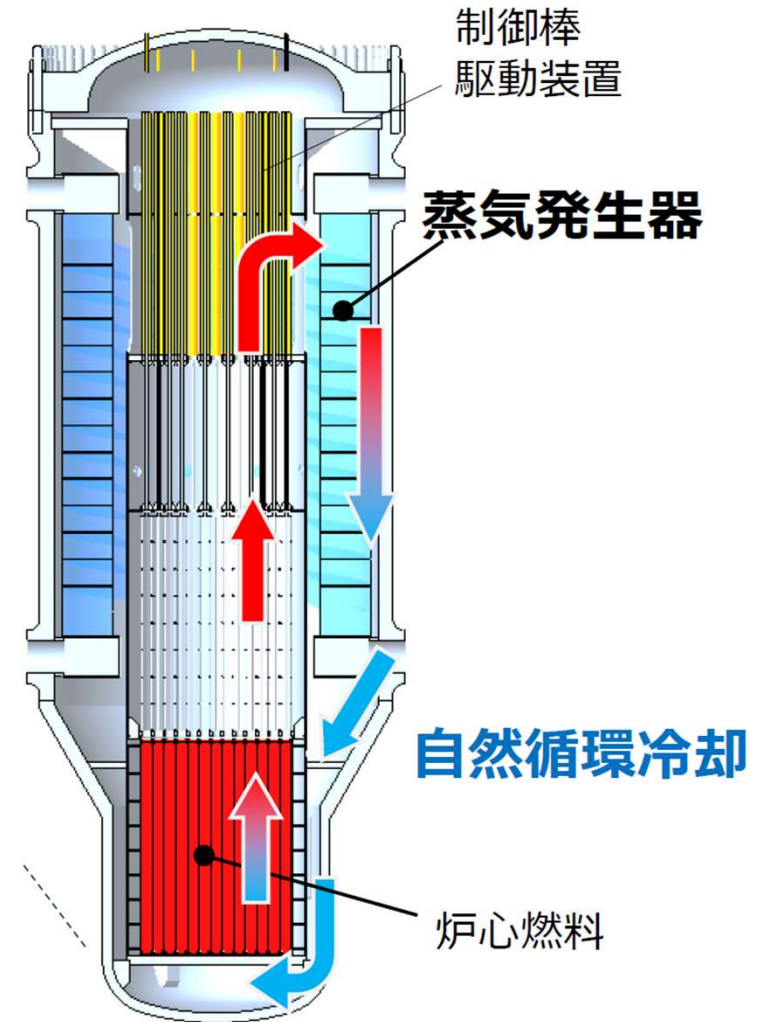


実用化を推進(国際競争を主導)



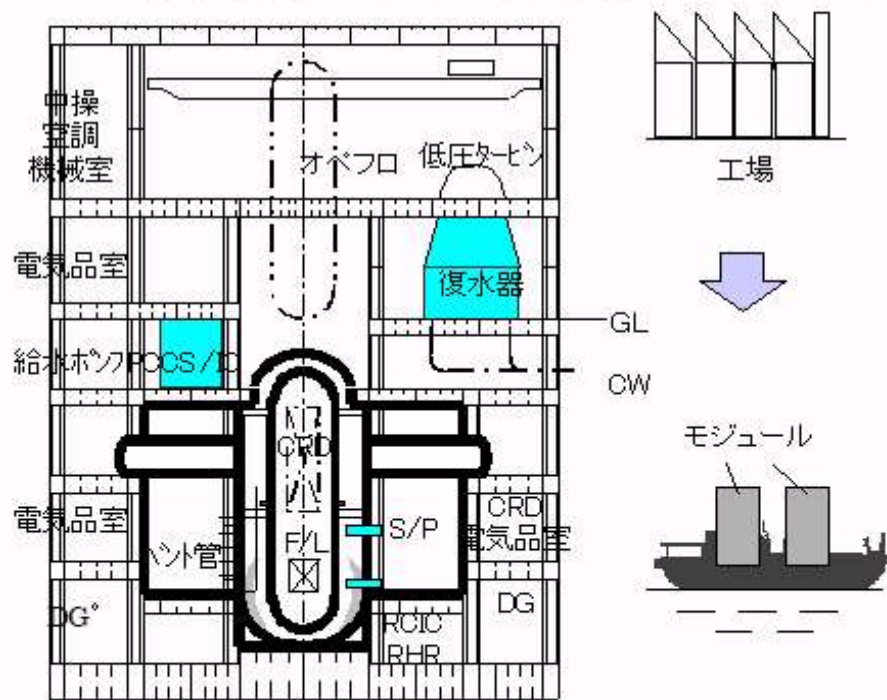
国際I-NERIで開発中のIRISも内蔵CRDを採用

革新的実用原子力技術開発提案公募事業「内蔵CRD」平成16年度審査会用資料 2005年3月10日



LSBWR 東芝のSMRを開発(奈良林)

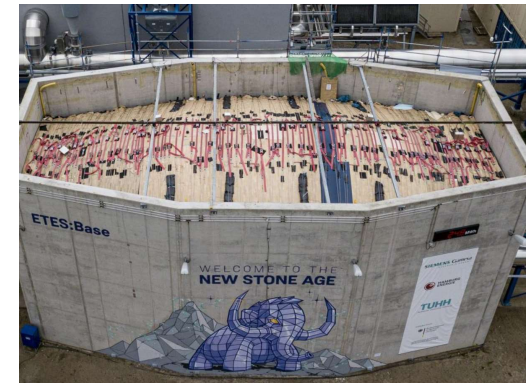
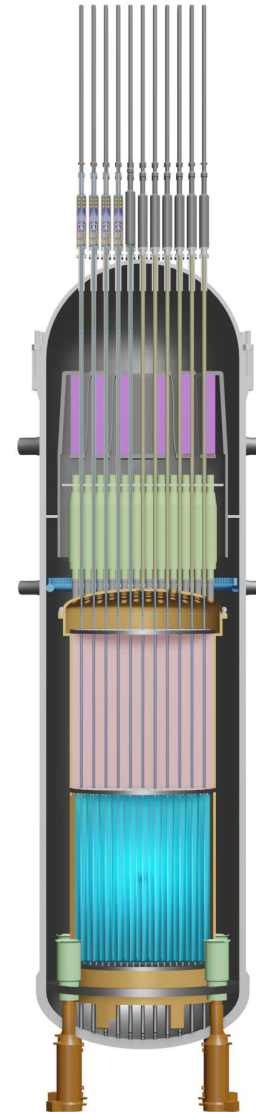
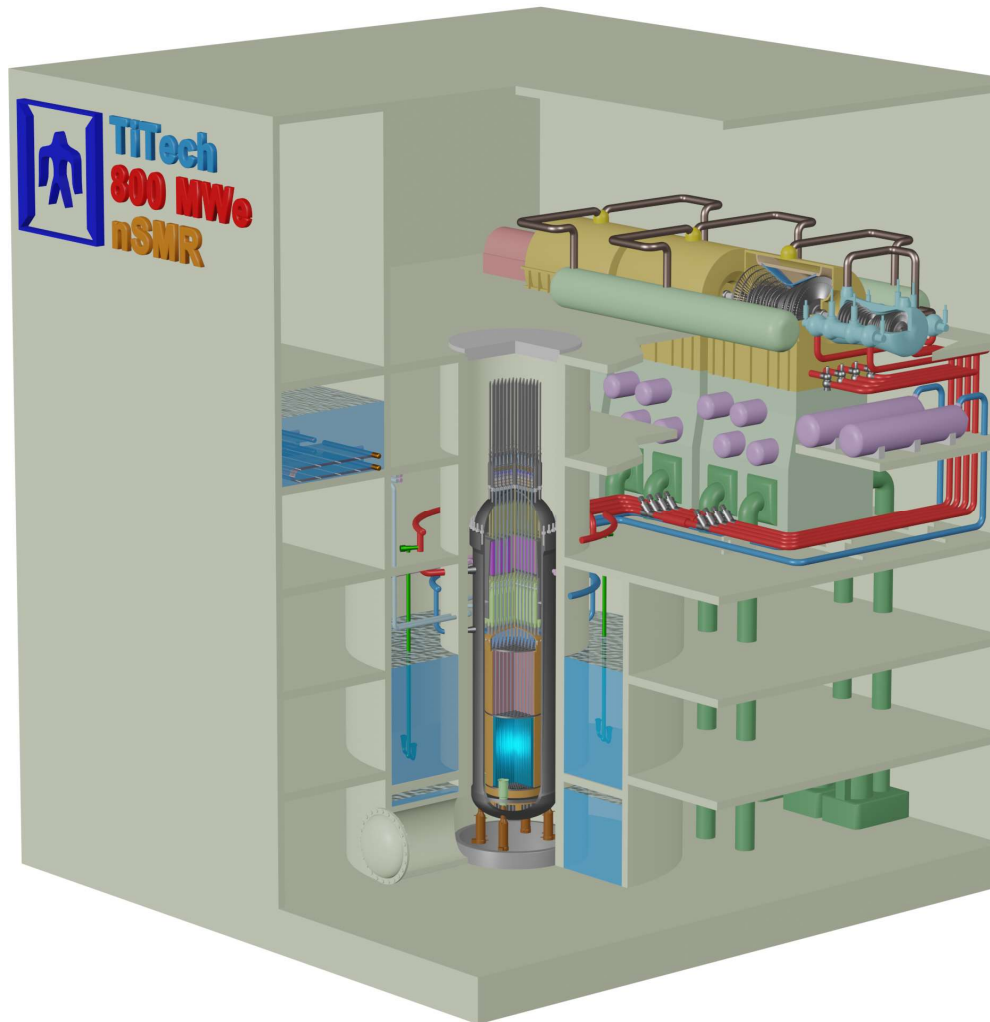
- システムの簡素化: 直接サイクル / 自然循環 / 静的安全系
- 簡素化: 原子炉建屋 / タービン建屋一体化
- 高稼働率: 超長期サイクル炉心



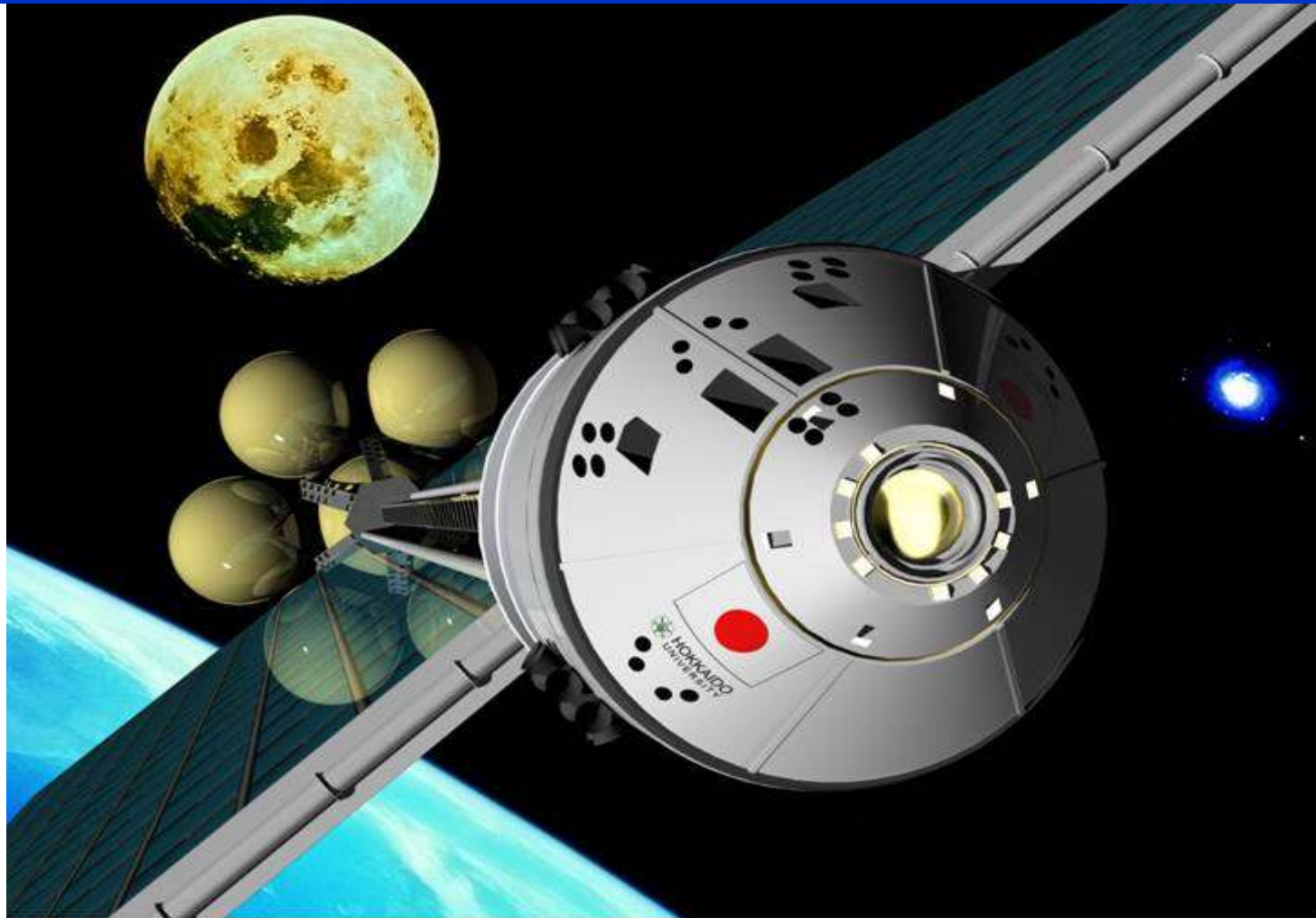
LSBWRの炉内機器の開発(PIC)[原機シ](炉S)奈良林

TOSHIBA

東工大のSMRの開発(再エネ共生型SMR)



5) 原子力推進宇宙船の開発(北大) マイクロリアクターと圧縮プラズマエンジン



北大の原子力宇宙船が記事に



目指せ 火星への有人飛行

人類が月の次に目指す火星への有人飛行。カギを握る原子力宇宙船の開発が米国やロシアで進み、長期飛行を模倣した医学実験も始まった。火星旅行は本当に実現するのか。その可能性と課題を探った。(長内洋介)

火星旅行への道

地球 → 中継基地 → 火星 (片道1年前後?)

原子力宇宙船の構成: 大型化学ロケットで部品を運搬、原子炉、推進剤タンク、放熱板、居住棟(定員3~6人)、衛星フォボス。

NASAの火星宇宙船のイメージ: 全長は約100メートル

ロシアの探査機で来年、フォボスに向かうネムロユスカの幼虫

人体への影響

- 放射線: 地球の磁気圏外では人体に有害な宇宙放射線が大量に降り注ぐ
- 精神・心理: 長期飛行は精神的なストレスが大きい。クルーの協働性が重要
- 食料: 新鮮な食料を自給するため、宇宙船内で野菜を水耕栽培

6月に始まったロシアの閉鎖環境実験「マーズ500」。火星飛行を模倣して被験者6人が520日間、閉鎖施設で暮らす

※写真はNASA、欧州宇宙機関、農業生物資源研究所・栗田隆氏提供
グラフィック: 西口裕之

往復は原子力宇宙船で 長期生活の医学実験も

オバマ米大統領は今年4月、2030年代半ばに火星周回軌道への有人飛行を行うと表明した。計画の詳細は不明だが、往復には原子力を利用した原子力宇宙船を使うとみられる。

米スペースシャトルは、液体水素燃料や化学反応により噴射ガスを発生させて飛行し、化学ロケットと呼ばれる。

この方式は大きなパワーを出せる反面、燃費が悪い。長期飛行では大量の燃料が必要になる。これに対して原子力宇宙船は燃費に優れ、長距離を短期間で飛行できる。ウランの核分裂反応により、少量の燃料で膨大なエネルギーが得られるから、原子炉の熱で水を蒸発して、電気を起こして

被曝を防ぐため居住棟は原子炉から離す必要があるが、ミニニューメキシコ大の設計図では全長約100m、重量約400tに及ぶ。巨大すぎて一度には打ち上げられず、まず化学ロケットで地球近傍の中継基地に部品を運搬。そこで宇宙船を組み立てて火星に向

JAXA、観測ロケット打ち上げ 4つの実験に成功

プラズマ収集装置開発にメド

宇宙航空研究開発機構(JAXA)は8月31日、観測ロケット「S520」25号機を、鹿児島県肝付町の内之浦宇宙空間観測所から打ち上げた。ロケットは約9分後に4

00t以上離れた海上に落下し、予定していた5つの実験のうち4つは成功した。

観測ロケットは高度1000~10000kmの宇宙空間を飛行し、落下するまでの間に各種の観測・実験を行う小型衛星ロケット。

「S520」25号機には、テープ状の導電膜(リザー)を使って姿勢制御などの推進力を得る「エレクトロライミックテザー(EDT)」の基礎実験を行う装置が搭載された。装置はJAXA、京都

てプラズマを噴射する方法がある。

被曝を防ぐため居住棟は原子炉から離す必要があるが、ミニニューメキシコ大の設計図では全長約100m、重量約400tに及ぶ。巨大すぎて一度には打ち上げられず、まず化学ロケットで地球近傍の中継基地に部品を運搬。そこで宇宙船を組み立てて火星に向かうシナリオが有力だ。

■米露は50年の歴史

米航空宇宙局(NASA)は1960年代から原子力宇宙船の開発を続けてきた。アポロ宇宙船を月に運んだサターンロケットに原子炉を搭載する研究などが行われ、地上燃焼試験も実施した。計画の多くは資金難で中止されたが、基礎研究は相当の蓄積がある。

宇宙用原子炉に詳しい日本原子力研究開発機構の岩村公道上級研究主任は「コストを度外視すれば、技術的には開発可能だ。ただ、打ち上げ失敗で原子炉が地球に落下する危険性は否定できない。この

■懸念される放射線

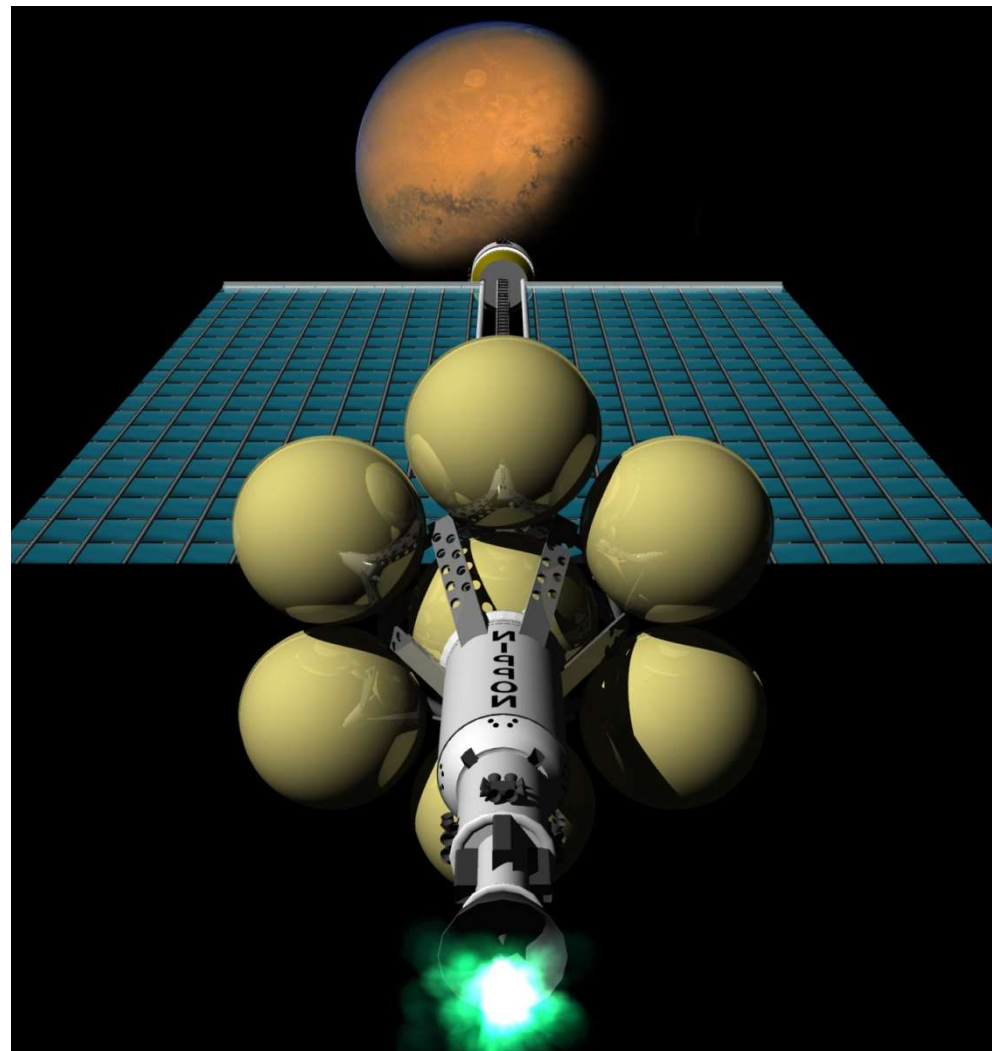
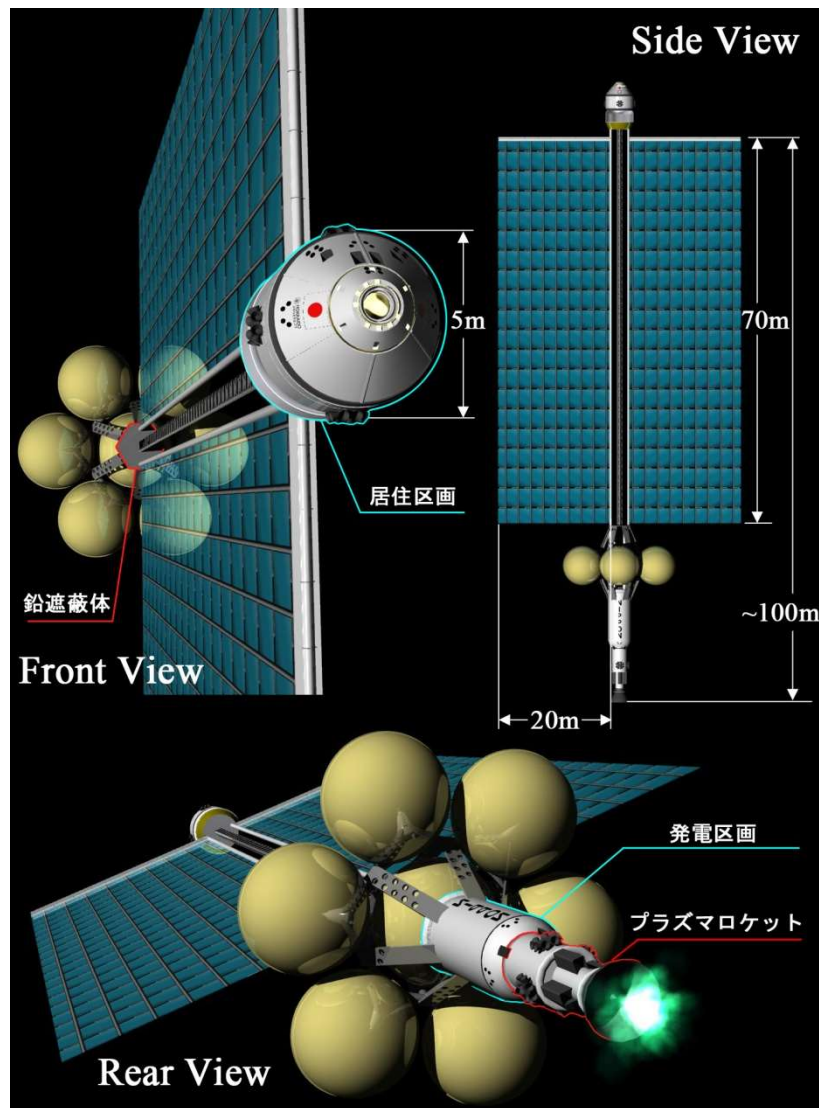
火星は片道約1年の長旅。飛行士の健康維持でも課題は多く、特に懸念されるのは有害な宇宙放射線の影響だ。地球の周囲は磁気圏で守られているが、外へ出るほど放射線の

秋月若魚の 写真

ヨシノボリに代表される哺乳類なのに卵生の珍獣は世界に3種だけ。ハリモグラもそのひとつだ。哺乳類の中では最も古参の部類で、その仲間には恐竜の時代から存在している。



原子力推進宇宙船の全体図



推進エンジンの選定

■ 性能比較によって原子力宇宙船に相応しい推進機関を選定した

候補	平均排気速度 v_{ex} [m/s]	比推力 I_{sp} [sec]	最高到達速度 (推進剤質量＝船体質量 の場合)
固体燃料 化学ロケット	2500	250	3.61
液体燃料 化学ロケット	4400	450	6.35
イオンエンジン	29000	3000	41.84
<u>プラズマロケット</u>	<u>290000(max)</u>	<u>30000(max)</u>	<u>418.38(max)</u>

長距離・長期間に渡る深宇宙航行に最適なのは

プラズマロケット である。

電磁プラズマロケットエンジン

ヴァシミール

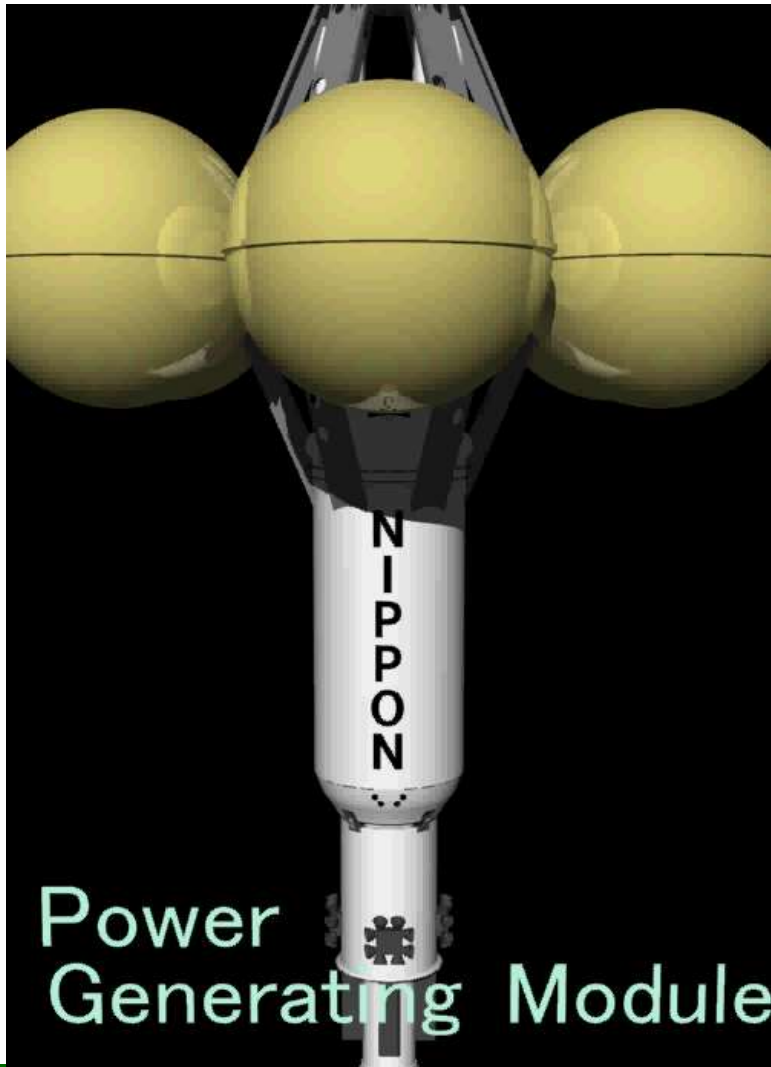
VASIMR (比推力可変型電磁プラズマロケット)

- NASA-ASPLで開発されている先進的推進装置
- 最高性能の電気推進機関 (比推力 $I_{sp}=30,000$ 秒)
- 最大値以下任意の推力・比推力を実現でき、即ちより効率的な推進が可能となる
- 上記を起動・加速している限り印加電力一定で実現するので、原子炉の運転が容易になる。
- MW級の大電力を要する



発電システム構成

■ 液体金属ナトリウム冷却高速炉＋スターリングエンジン



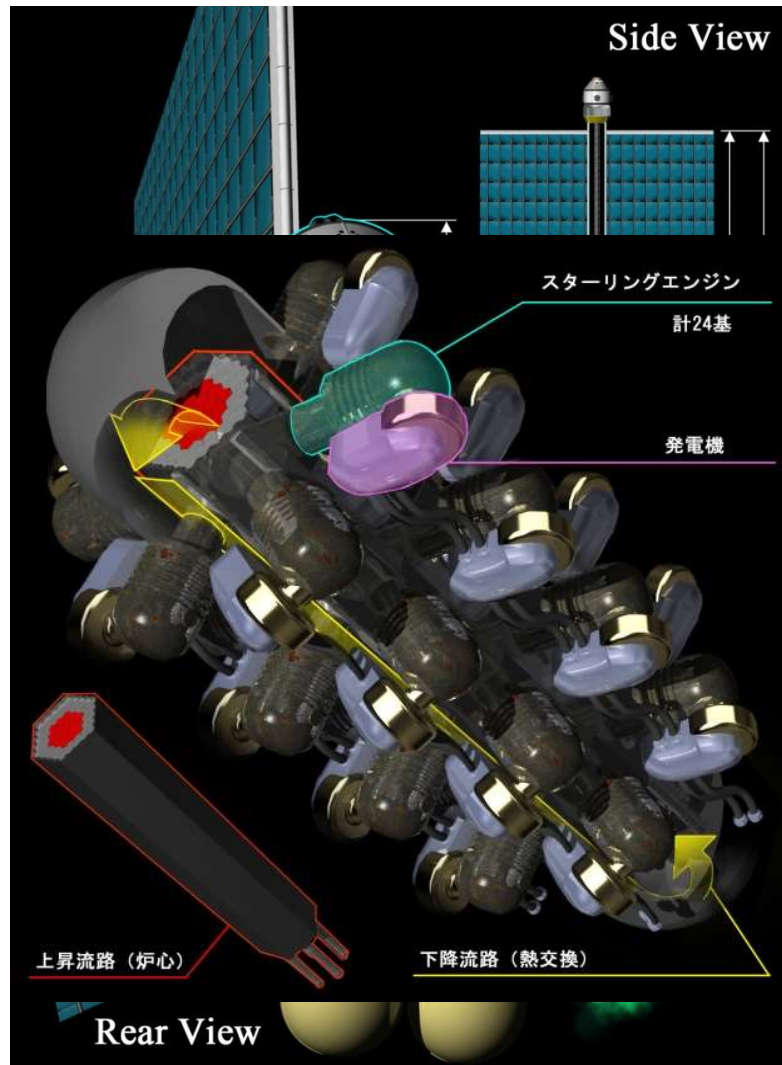
■ ナトリウム冷却高速炉

高温低圧運転によって高い発電・排熱効率と質量の低減を見込める。

■ スターリングエンジン

高い理論熱効率を持ち、水を用いないことによりNa-H₂O反応の危険が無い。

Development of Nuclear Power



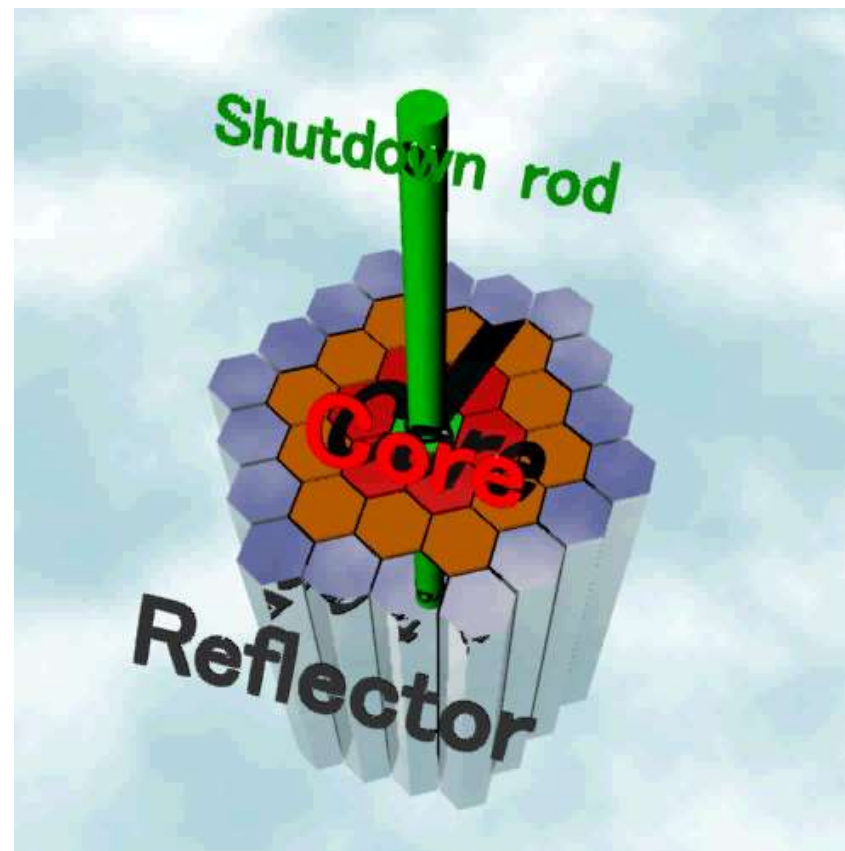
- ・現代の宇宙探査・開発の高度化、大規模化より、今後宇宙空間における、より大きな電力の需要が増える。
- ・深宇宙(火星以遠)では太陽電池の利用が不可能であるため、原子力で発電する宇宙船を検討。
- ・発電システムとして、高速炉とスターリングエンジンを利用。

- ・実機スターリングエンジンのより詳細なデータを得るためにエンジン特性実験。
- ・炉心発電出力変更時の過渡応答特性を核熱結合計算により解析。

炉心構成

信頼性の高い既存技術の採用

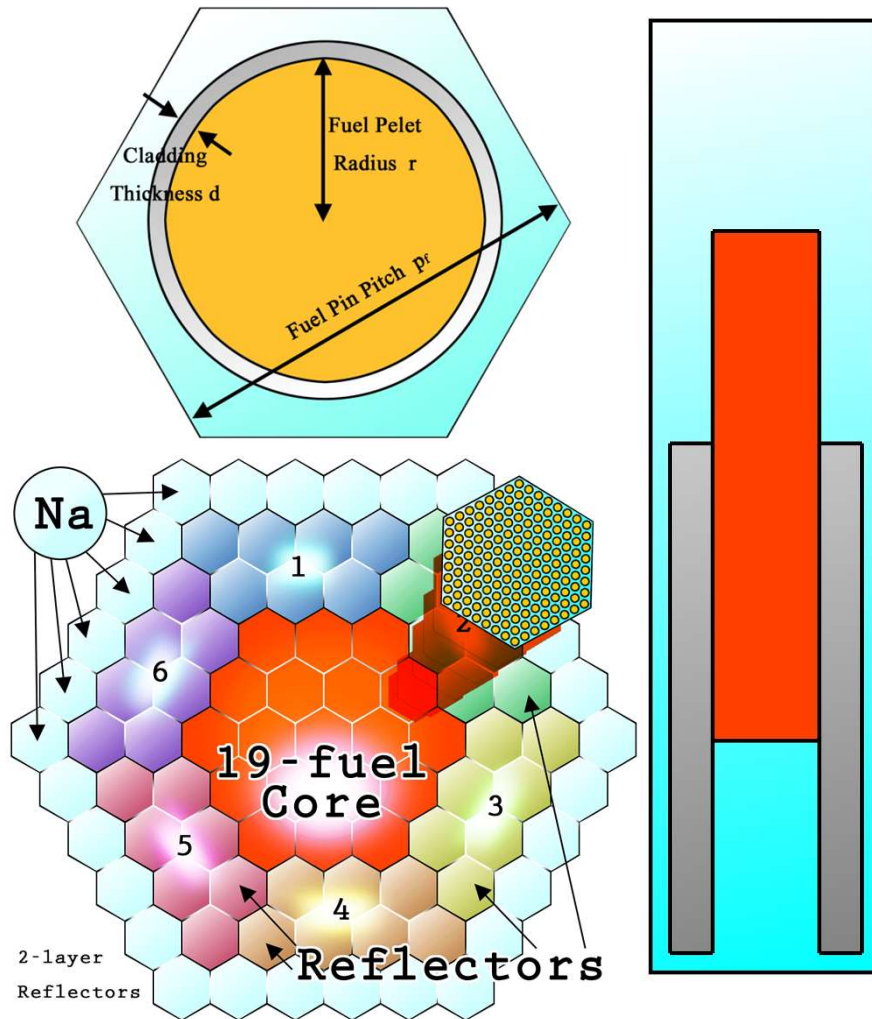
- 4S 炉(©東芝・電中研)の設計概念
 - 小型・シンプル → 低質量
 - 安全 → 負のボイド反応度
 - × 長寿命 → 小型化優先
- 同炉の臨界制御手法
 - 質量削減
- FBRもんじゅの燃料集合体
 - 機械的信頼性の向上



以上を基に汎用核計算コードSRAC2006を用いて核計算を行い、全条件を満たす設計ケースを探した。

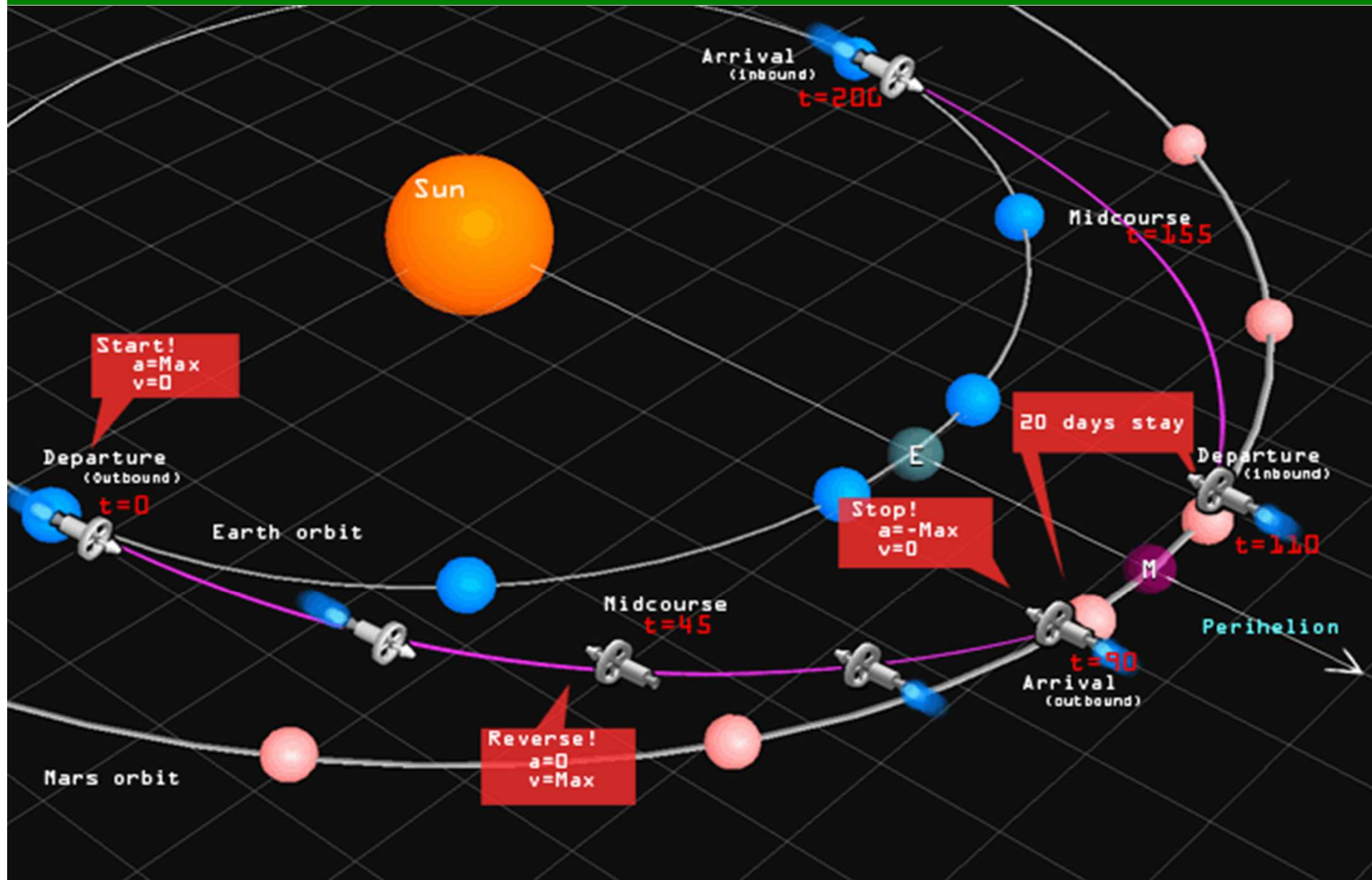
原子炉の設計計算ができた！

■トライアンドエラーの末、全条件を満たす唯一の設計ケースを見出した。



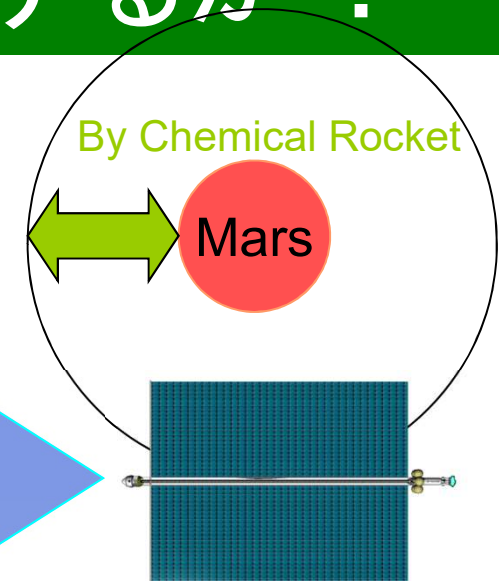
燃料タイプ	MOX
炉停止棒	無
集合体内燃料ピン数	169
炉心入口温度 [C°]	550
炉心出口温度 [C°]	656
流路内冷却材流速[m/s]	0.5
燃料ペレット半径 r [mm]	2.7
被覆管厚さ d [mm]	0.47
燃料スミア密度 [%TD]	87
燃料ピンピッチ p_f [mm]	6.75
集合体ピッチ p_a [mm]	105

ミッションプランの解が得られた



巨大宇宙船の組立はどうするか？

電気推進は惑星表面重力に抗えるような大きな推力を発揮できない。



軌道上で組み立て

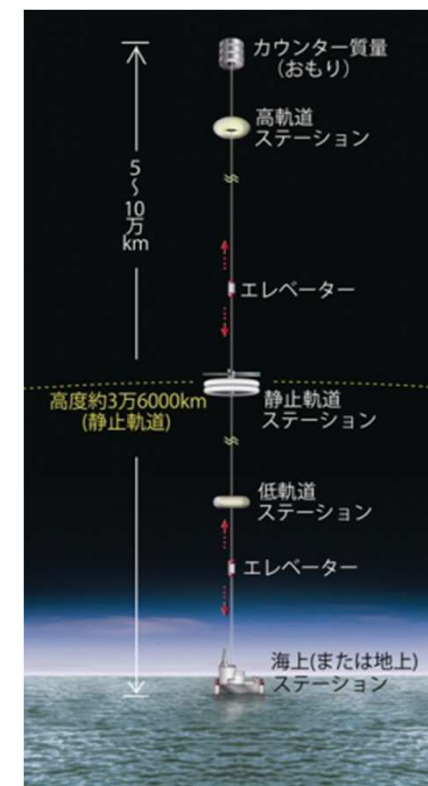


宇宙船は惑星表面重力には晒されず僅かな推進加速力 (~0.1G) にさえ耐えられれば良いため、最低限の船体強度があればよい。

→ 軽量化

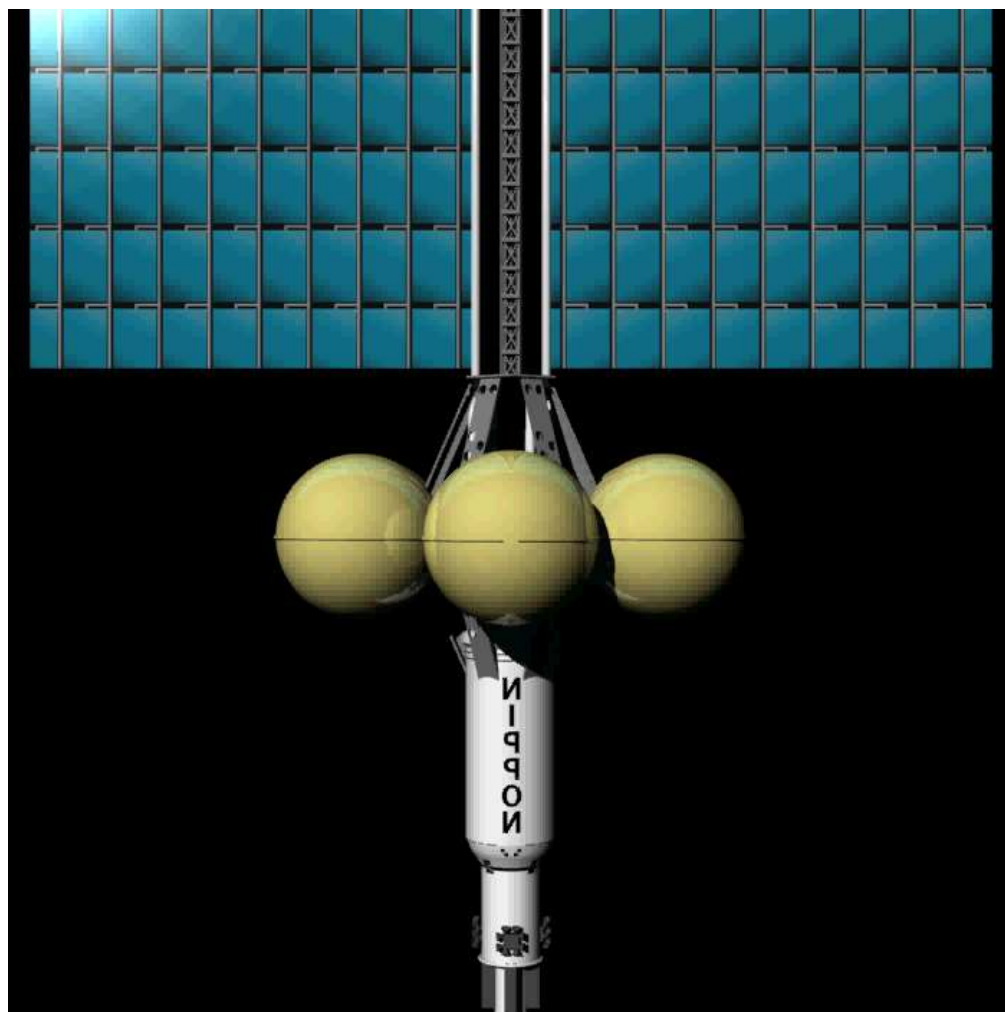
宇宙エレベータの開発が進んでいる

- 一種の静止衛星で、重力と自転遠心力が釣り合う**静止衛星軌道から、上下にケーブルを垂らして建造**される。
- 唯一の課題は強大な張力を支えるケーブル材料(カーボンナノチューブが有力)



宇宙船の船体構成概要

主要構成要素

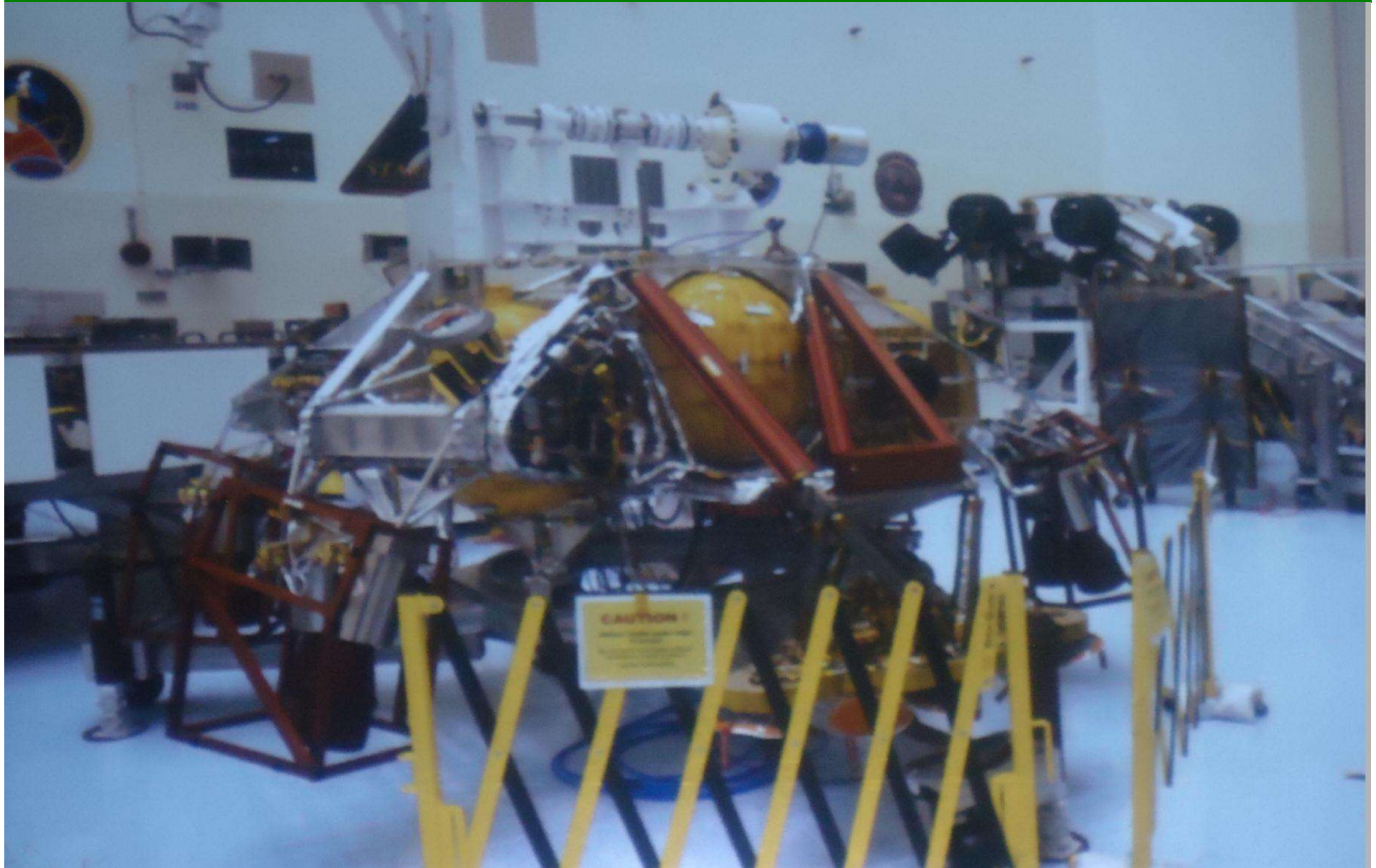


- ・居住区 (ORIONを参考)
- ・ラジエーターパネル
およびメインシャフト
- ・推進剤タンク
- ・発電モジュール
- ・推進機関

アトラスV ロケットがケネディ宇宙センターに到着



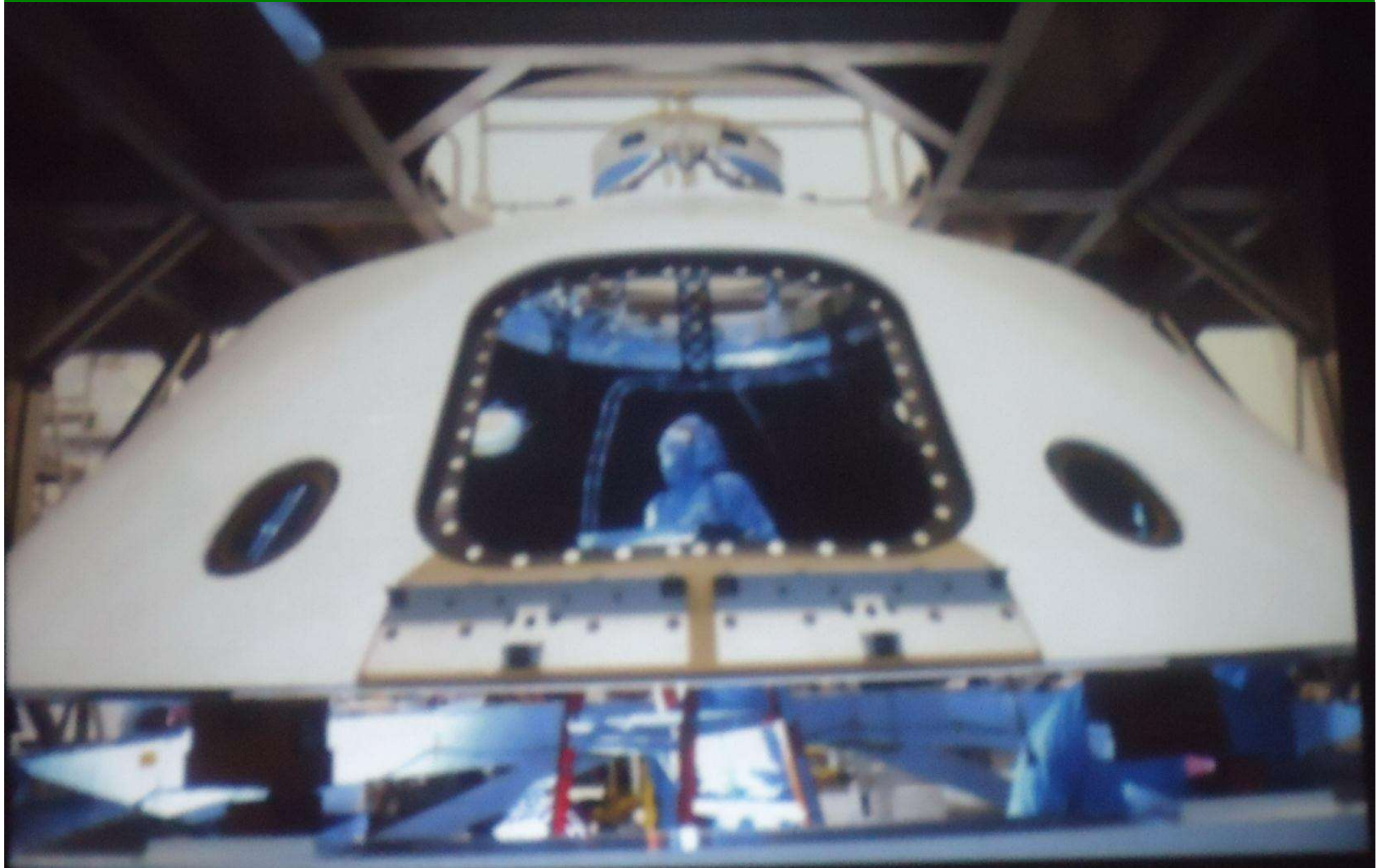
原子カバットの搭載



キュリオシティの人工衛星へ搭載



ロケット先端の組み立て



ロケット先端の組み立て



組み立て



キュリオシティの電源は10.6ポンドの プルトニウム238の原子力電池

10.6 Pounds of PU-238 in 32 Cubes

(Half Life 87.7 y)

Alpha Emitter

Solid State Thermoelectric Conversion

Provided by DOE

Manufactured by Hamilton Sundstrand

Generation Capacity is 125 Watts electrical energy

From 2000 watts of heat energy

2.6 KWH electrical energy/day

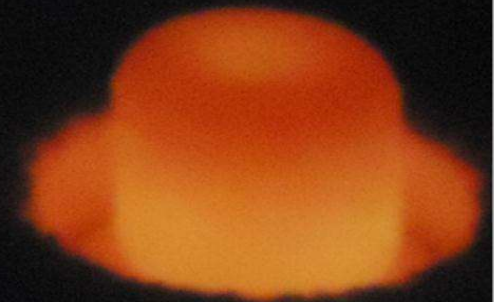
Thermal heat used to warm electronics bay

Excess heat radiated to atmosphere

Two rechargeable Lithium-ion batteries having capacity 42 amp-hr

To provide extra power to the rover when the demand exceeds the

output capacity

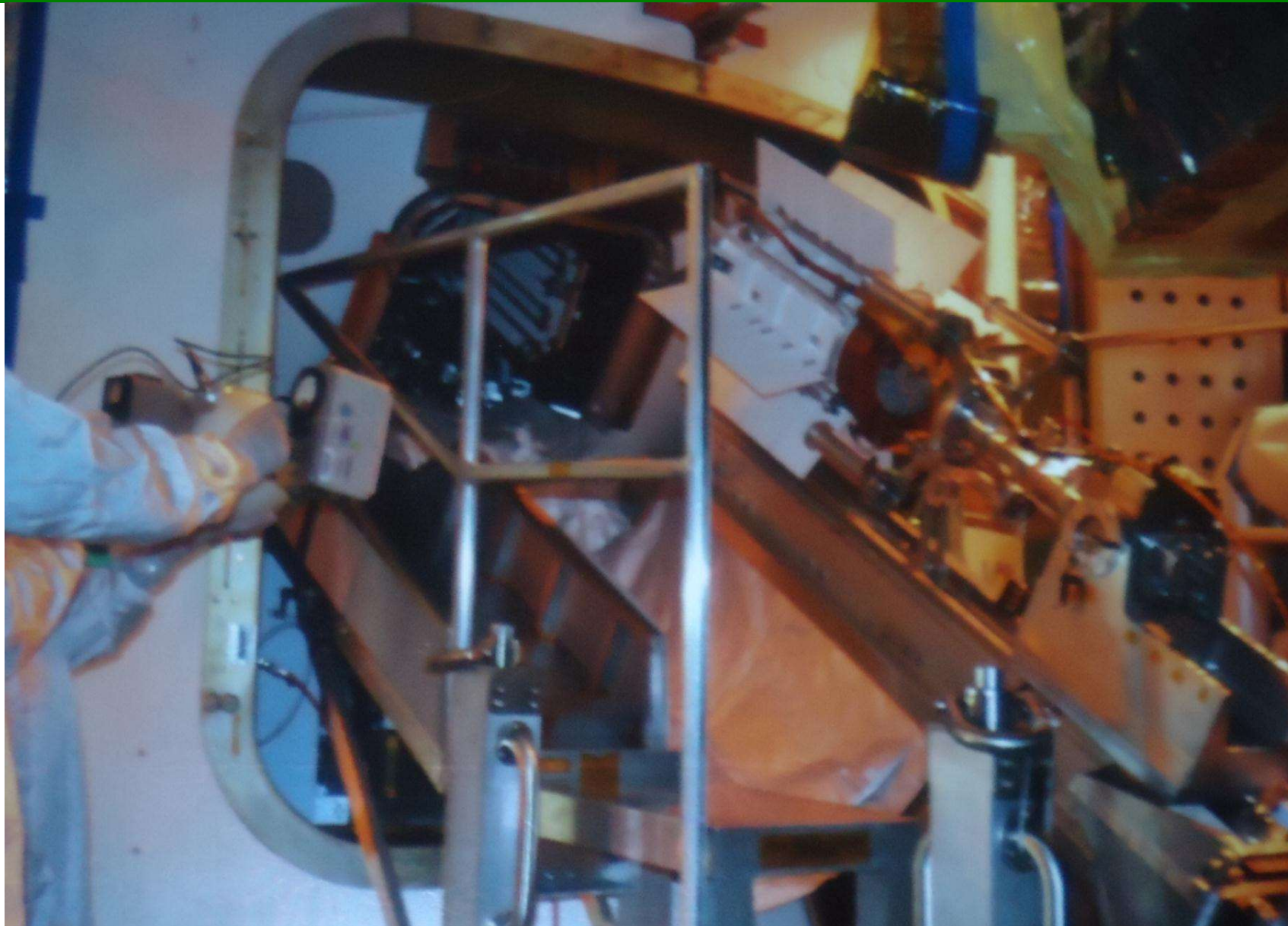


P238 Pellet
Product

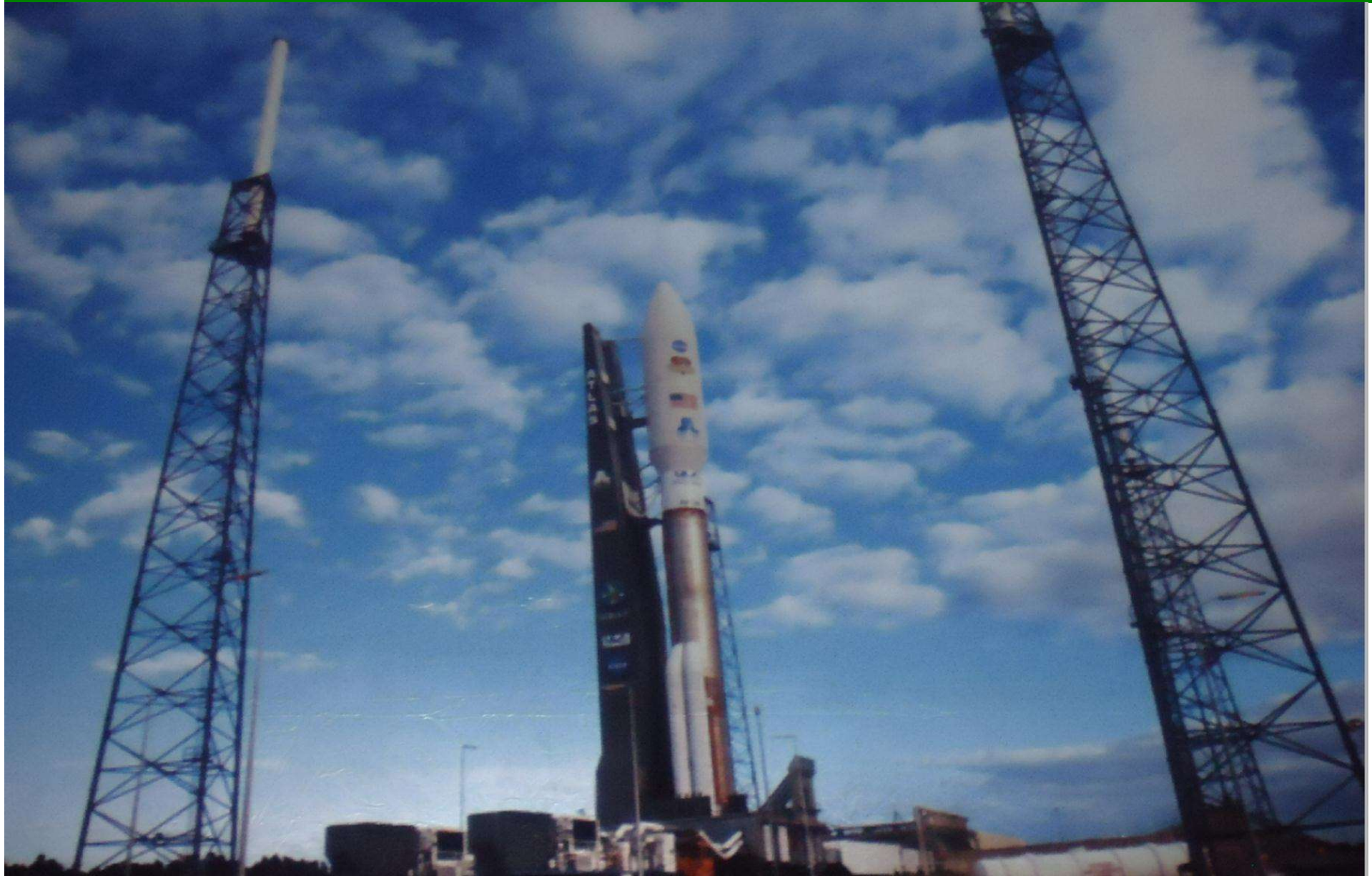
Nuclear Power Battery



原子力電池を搭載



ロケットの打ち上げ



火星の科学研究室：探査車キュリオシティ

<http://response.jp/article/2012/06/12/175996.html>

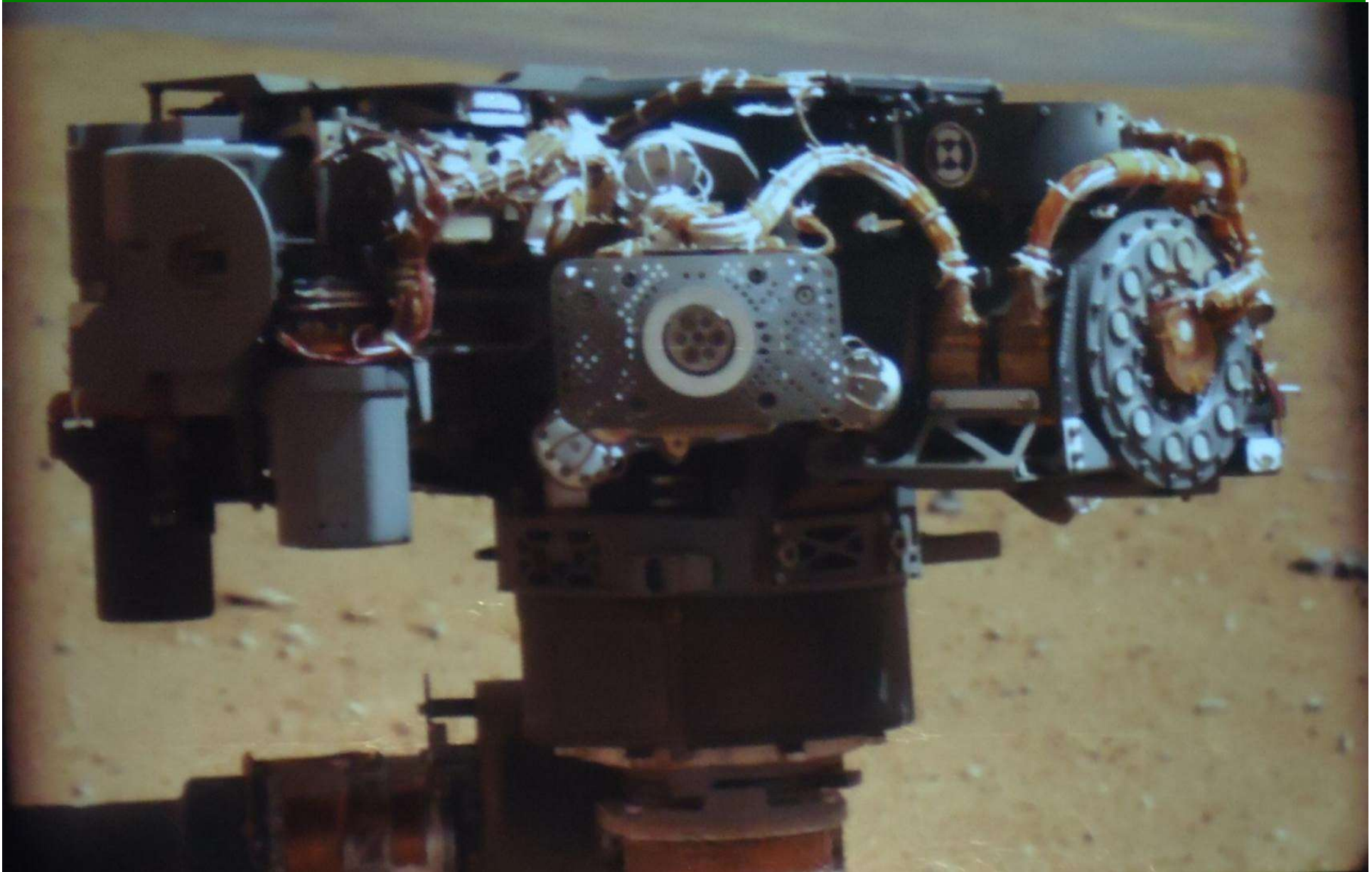
米NASAは、火星に向けて飛行中の探査機「キュリオシティ」の火星着陸を2012年8月6日の午後2時30分ごろに決定したと発表した。

火星での生物の生存痕跡を捜索することが主なミッションとなっているキュリオシティ。NASAはキュリオシティの火星着陸について、イメージCGを公開している。



今回のHomework: Curiosity
について調べてまとめなさい

火星に着陸したキュリオシティ



火星の風景（緑が無いが地球に似ている）

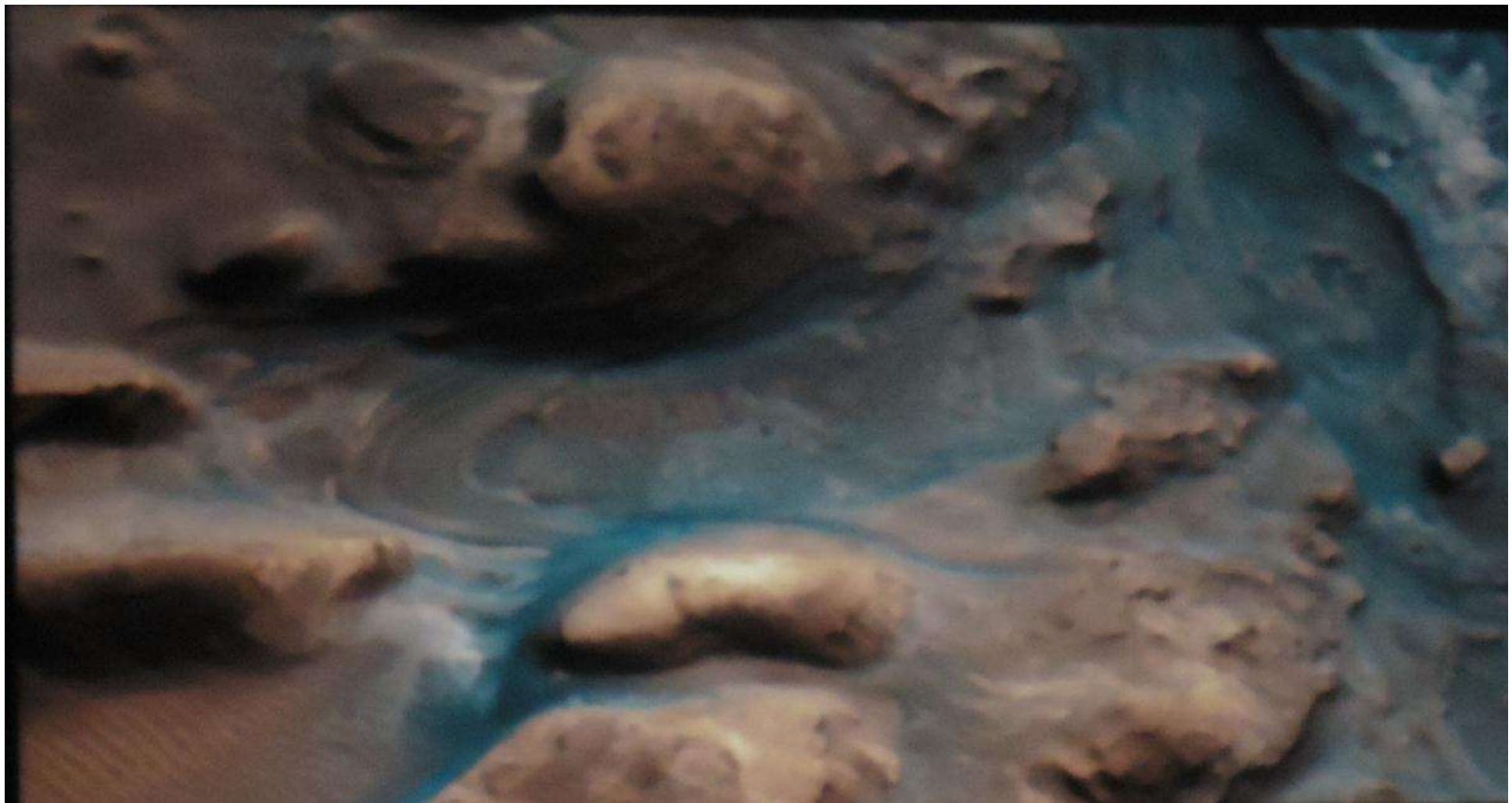


火星の風景(水による山肌の侵食)



火星の表面には水溶性の物質が沈殿

Aqueous and Aeolian (水溶性成分と岩石成分)



かつて火星には大量の水と大気が存在した

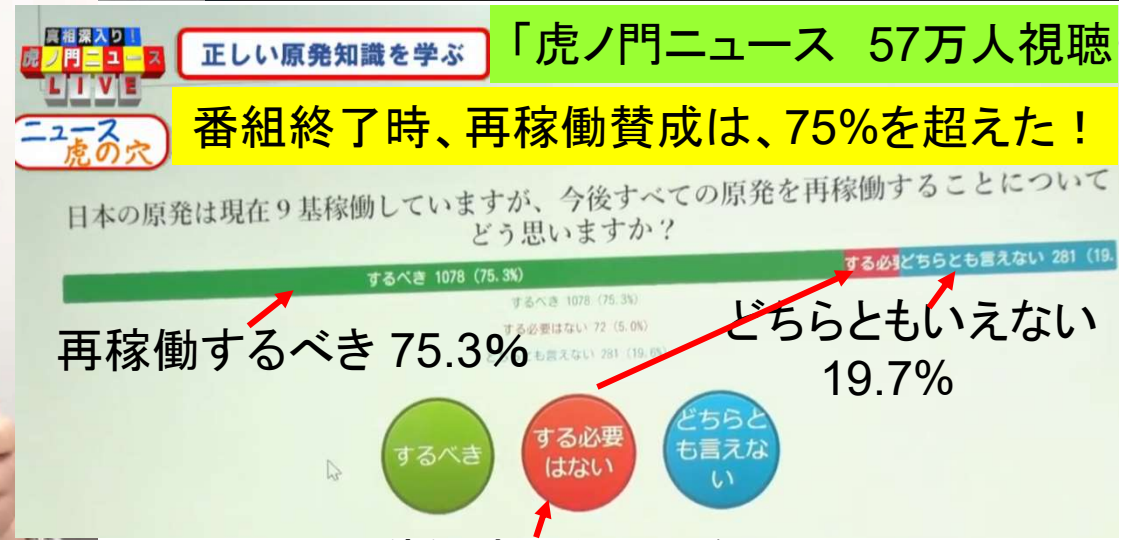
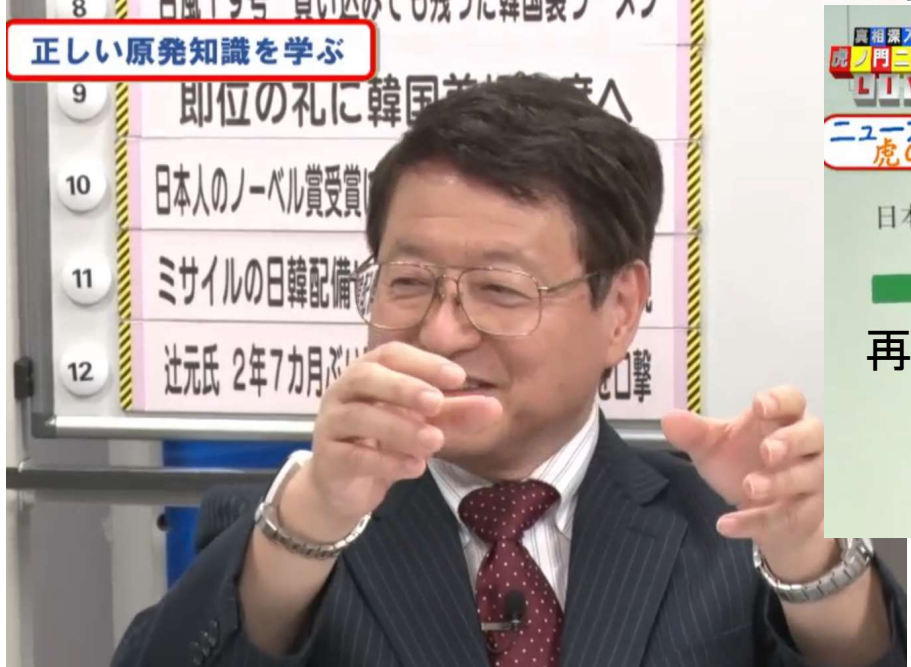
地球が100年に2°Cの温度上昇でいくと3000年後の夏の最高気温は100°Cになり水が蒸発する。水と大気を失う。



H₂O

Past and Present

2019年10月15日 虎ノ門ニュースに出演しました



<https://freshlive.tv/toranomonnews/272875>
<https://www.youtube.com/watch?v=Th714NEpc8Q> (57万人が視聴)

まとめ

- 地球の環境危機の時代にあっては、原発を止めると人類や生物の存続にかかわる将来的な危機をもたらす。
- 再エネを火力発電所と抱き合わせで使うとCO₂減らない。
- 現在、国際的に再生可能エネルギー（再エネ）が礼賛され、世界中が再エネで電力の全てをまかなえるかのような錯覚に陥っている。
- 太陽光発電の設備利用率は、高々13%しかない。
- CO₂排出削減するには、再エネ共生型の原発は必要。
- 我が国は、CO₂の排出が少ないフランスを目指すべき。
- 第6次エネルギー基本計画ではSMRの開発に注力。
- 安全性を高めた最新型炉の新增設・リプレースを開始しないと原子力発電メーカーの技術基盤（設備と人）が衰退する
- 第6次エネ基は、我が国を衰退させ中国に貢ぐだけ。