



高速増殖炉

Fast Breeder Reactor (FBR)

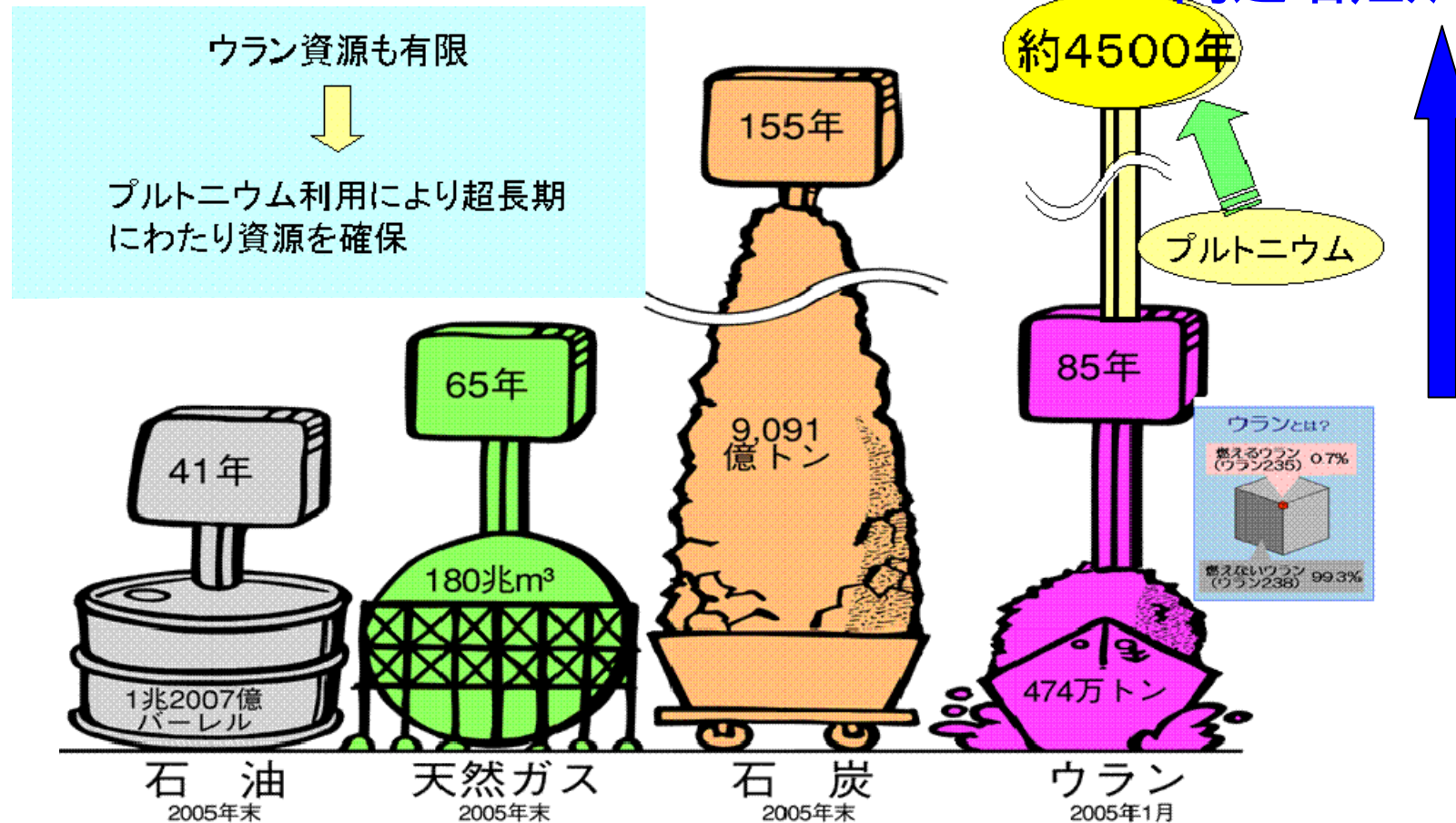


世界のエネルギー資源確認埋蔵量



University of Fukui

高速増殖炉の効果

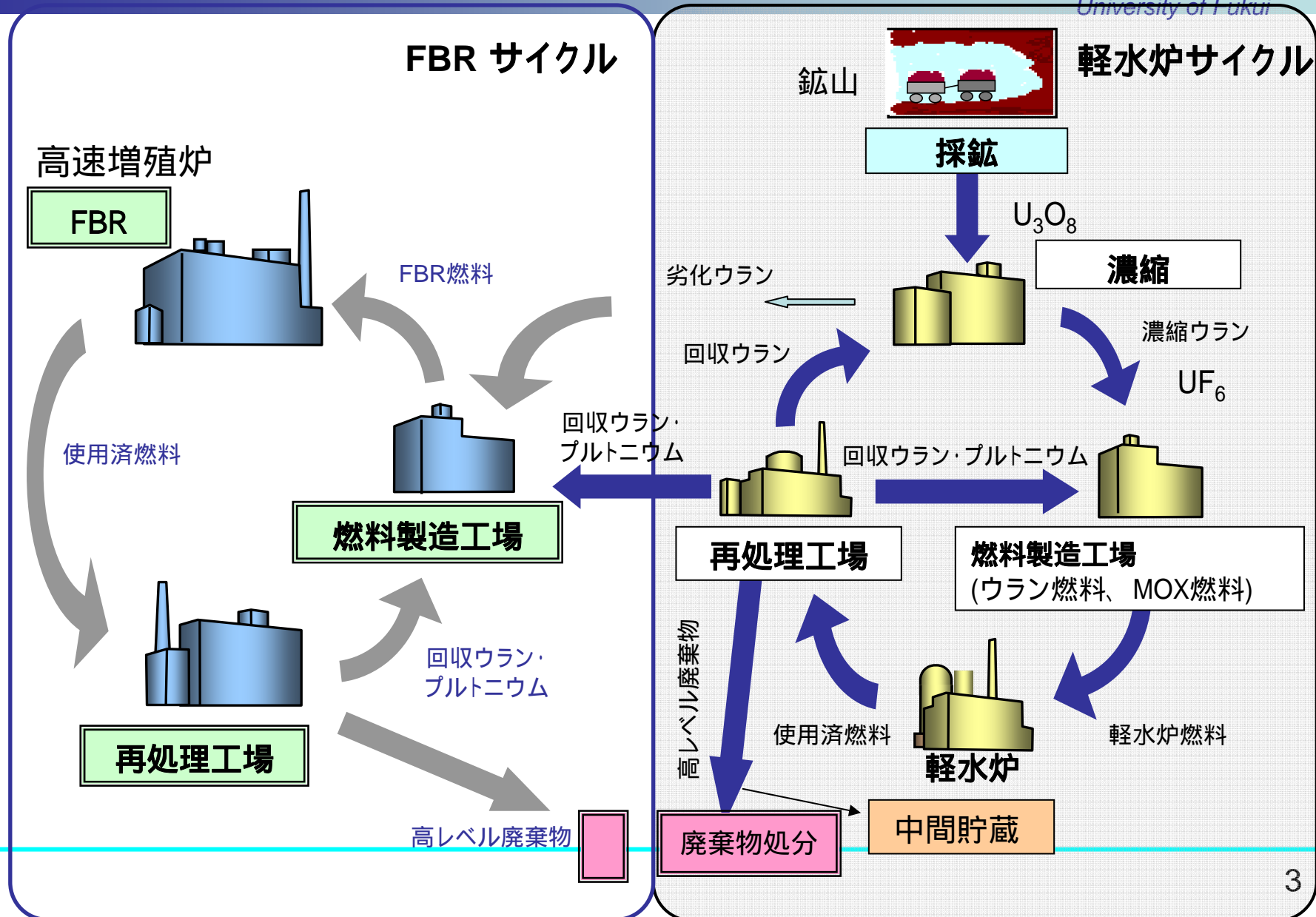


出典：(1)BP統計2006
(2)URANIUM2005

核燃料サイクル



University of Fukui



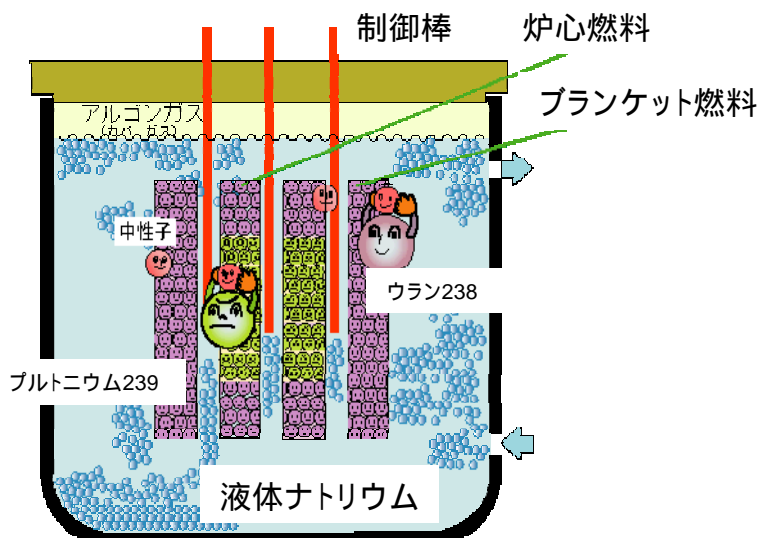
高速増殖炉と軽水炉



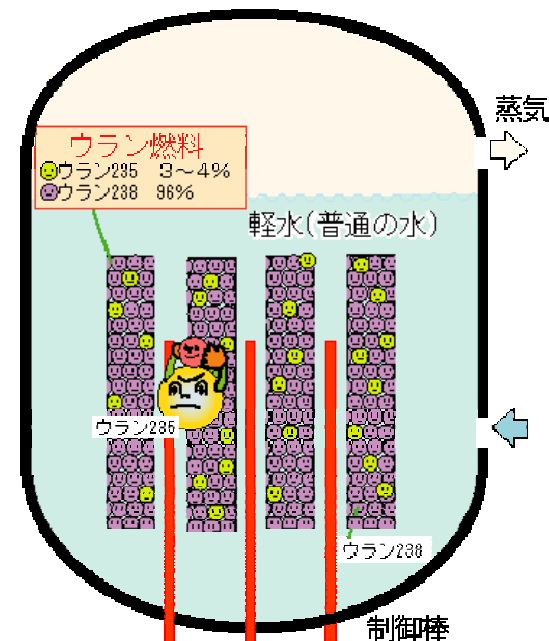
University of Fukui

高速増殖炉 燃料を増やすため
数千年の利用が可能

軽水炉: 燃料を消費するため50年程度で
利用できるウランが無くなる



数千年の利用が可能

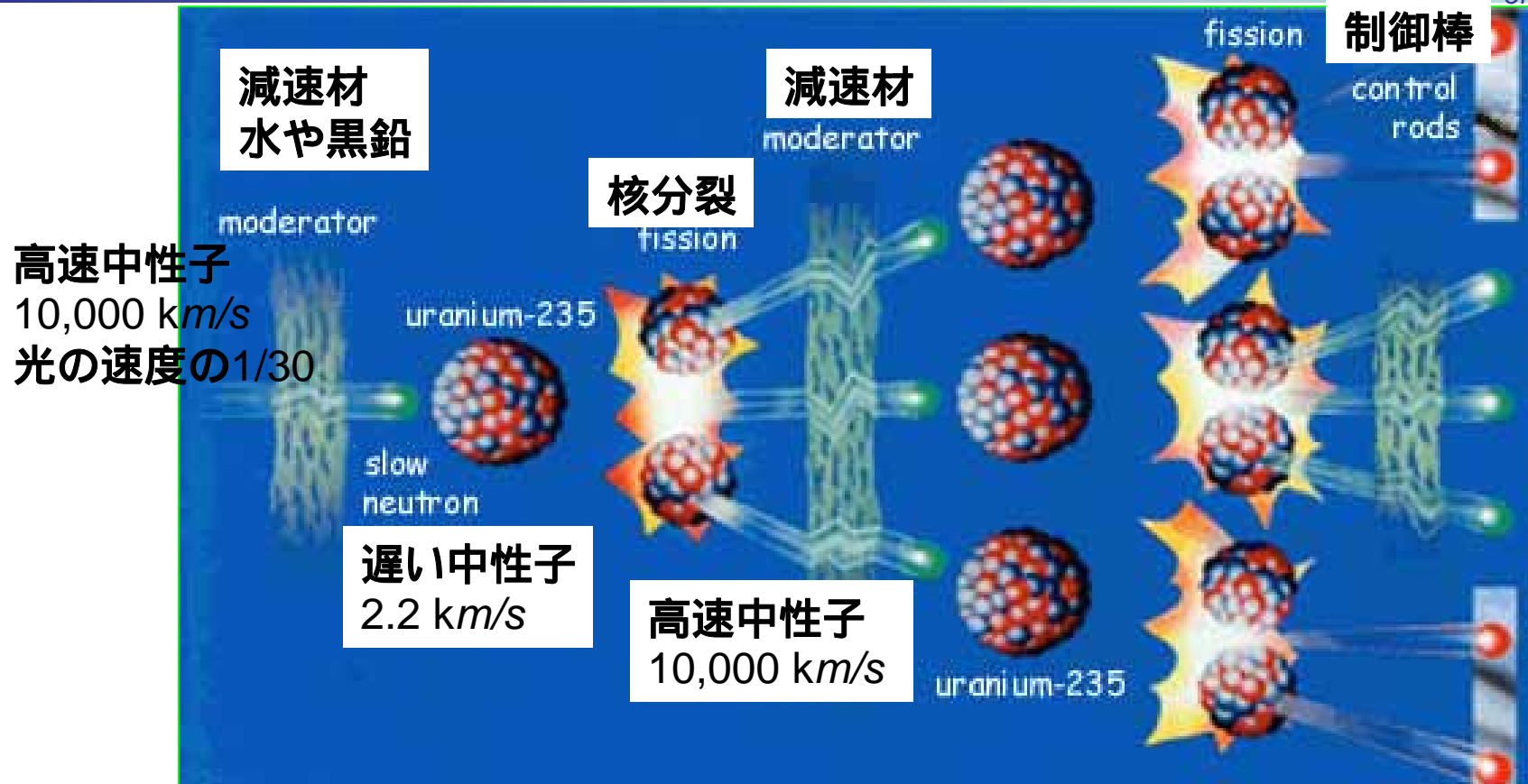


高速増殖炉		軽水炉
プルトニウム(約20%)とウラン(約80%)の混合燃料	燃料	微濃縮ウラン(ウラン235が約3~4%)
液体ナトリウム	冷却材	普通の水(軽水)
なし	減速材	普通の水(冷却材と兼ねる)
高速中性子の利用	核分裂反応	低速中性子の利用

軽水炉や黒鉛炉における核分裂反応



University of Fukui



^{235}U は遅い中性子に反応する性質を持つ
一部の高速中性子は ^{238}U に吸収され ^{239}Pu になる。

高速増殖炉の特徴



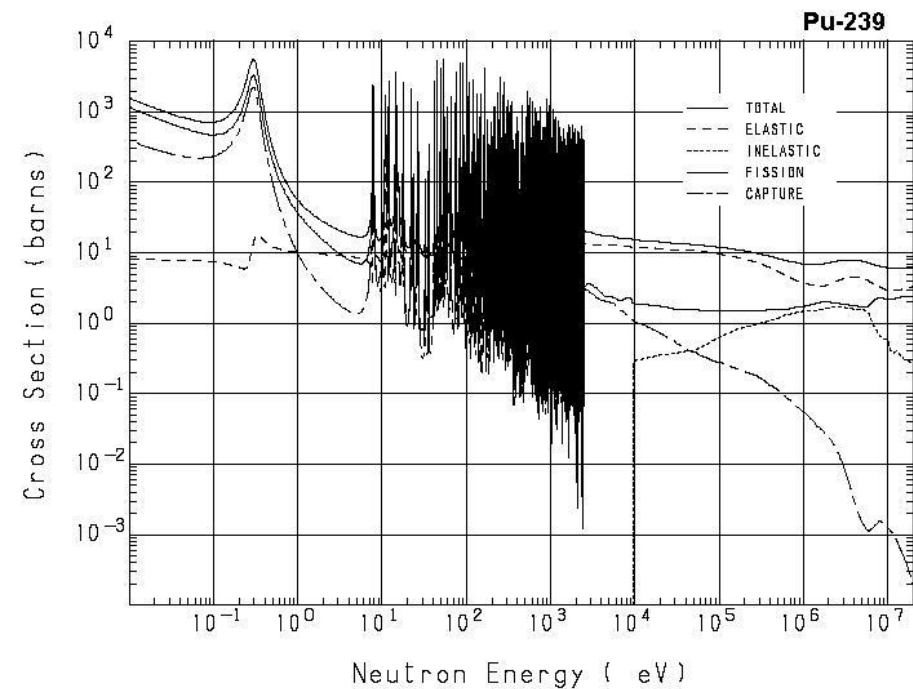
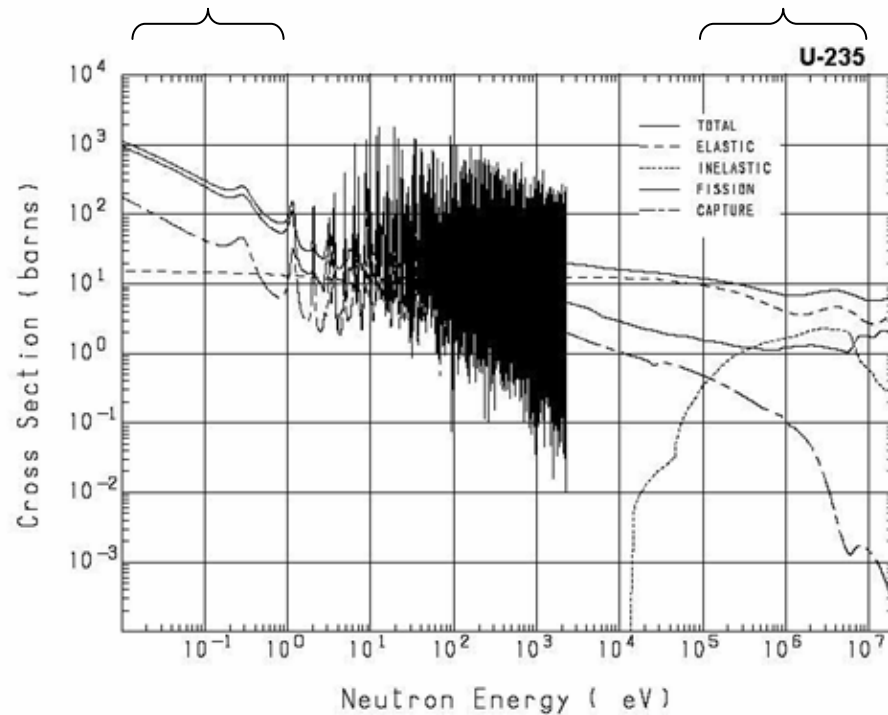
- 高速増殖炉は、使った以上の燃料を生産させるため、現在日本で運転されている軽水炉とは、異なった原子炉の構造をしている。
- 燃料を生産させるため、中性子の速度を減速させない。
- 核の特性によって炉心が稠密である。燃料の濃度も軽水炉より高い。
- 炉心が稠密であるため、液体金属で冷却する必要がある。

^{235}U , ^{239}Pu の核断面積



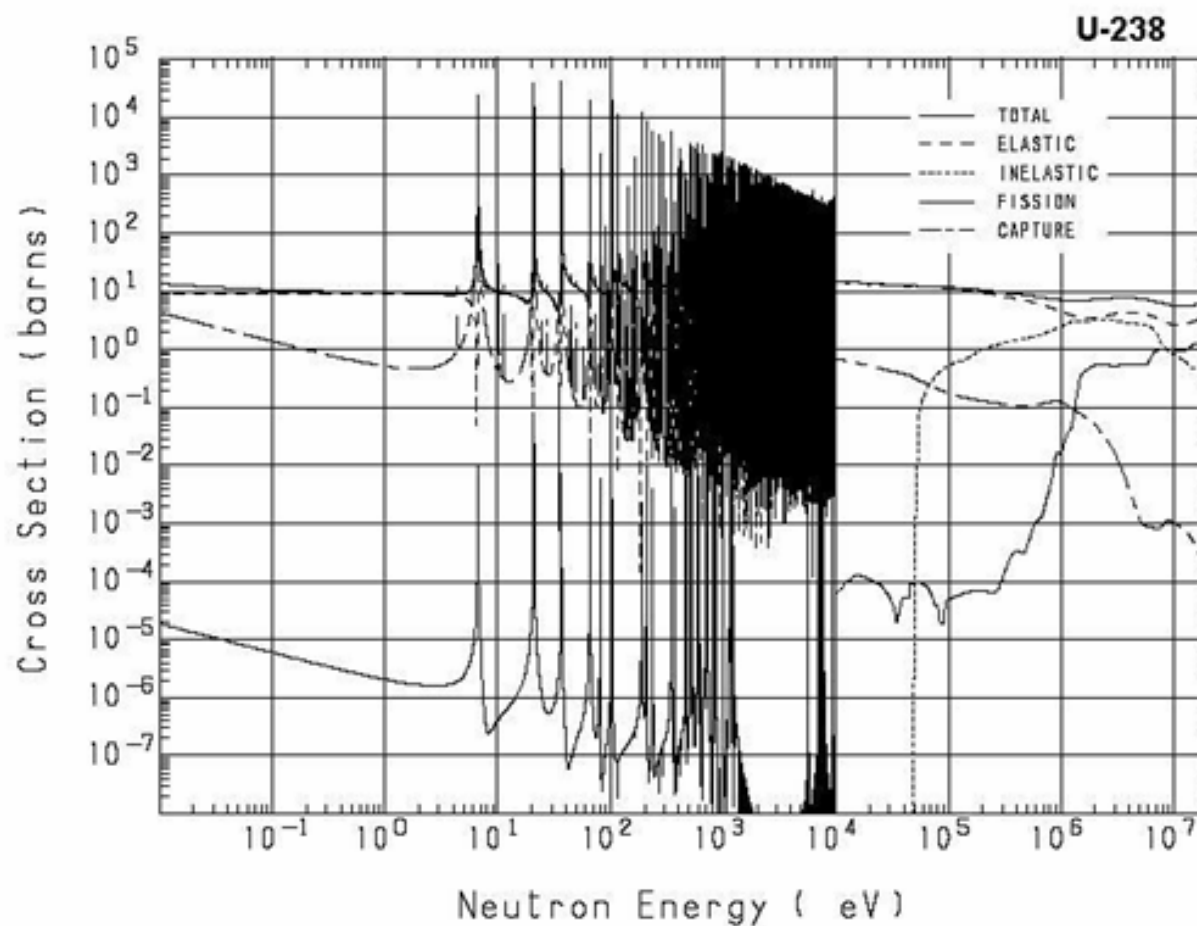
University of Fukui

熱中性子 中速中性子 高速中性子



- ^{235}U ^{239}Pu などの高速中性子での核分裂断面積は、熱中性子に比べて2桁低い。
- 濃縮したり富化度を高くした燃料を使用する必要があり、炉心の出力密度が高い。
- 高能率の炉心冷却を必要とする。

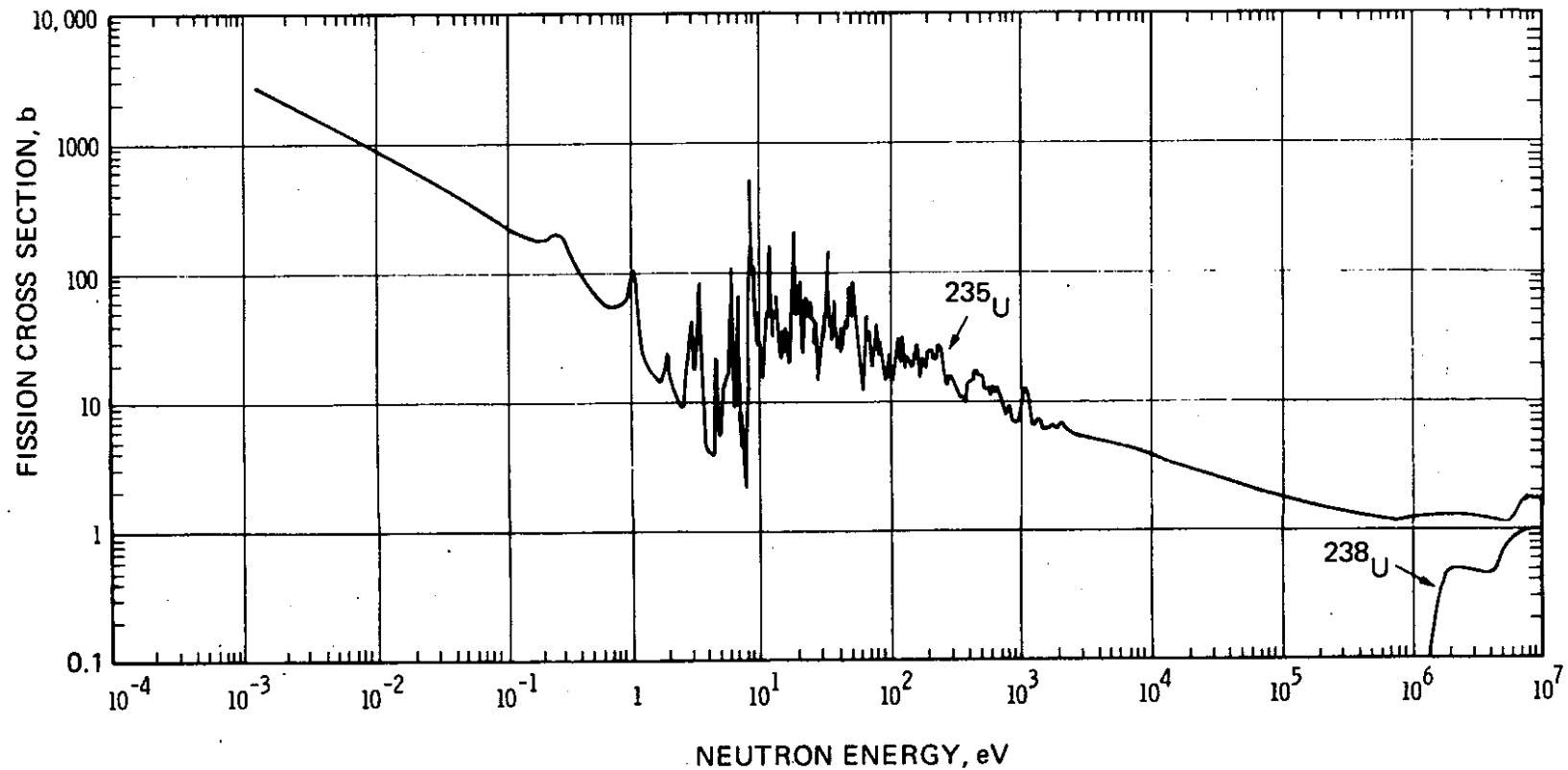
^{238}U の核断面積



^{235}U , ^{238}U の微視的核分裂断面積



University of Fukui

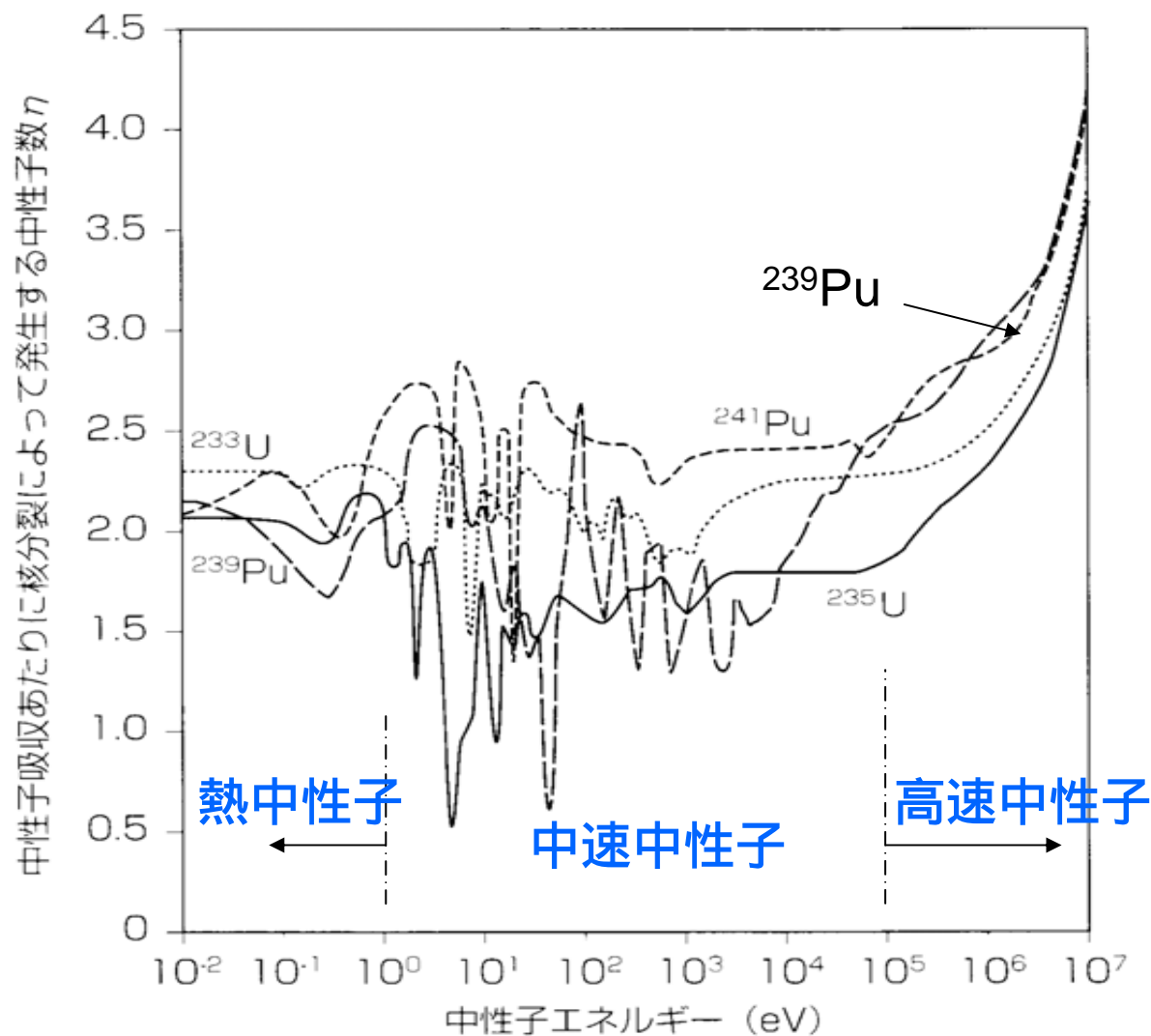


R A Knief, Nuclear Engineeringより

核分裂によって発生する中性子数



University of Fukui



が2以下の場合
には、増殖はでき
ない。

高速炉と軽水炉の特徴比較



University of Fukui

	軽水炉	高速炉
中性子寿命	10 ⁻⁵ 秒のオーダー	10 ⁻⁷ 秒のオーダー
遅発中性子割合	0.55 ~ 0.7%	0.34 ~ 0.37%
冷却材	軽水	液体ナトリウム
燃料	UO ₂ (濃縮度3 ~ 4%)	UO ₂ , PuO ₂
被覆材	Zircaloy	S.S.
燃料ペレット直径	約1cm	4 ~ 6mm
冷却材出口温度	280 ~ 320	500 ~ 550
原子炉出入口温度差	15 (B) ~ 35 (P)	130 ~ 150
運転圧力	7MPa(B)、15MPa(P)	ほぼ大気圧
出力密度	約90kW/l	約300kW/l
燃焼度	30,000 ~ 60,000MWd/t	100,000MWd/t
プラント効率	約32%	約40%

ナトリウムの特徴



University of Fukui

ナトリウムは、**軽くて軟らかい銀白色の金属**でリチウム、カリウム、ルビジウム、セシウムなどと同様に**アルカリ金属**に属する。**銀白色で軟らかい金属**、**重さは水の約0.97倍**(at 20)である。

融点は約98 (97.8)で、固体から液体に変わる。

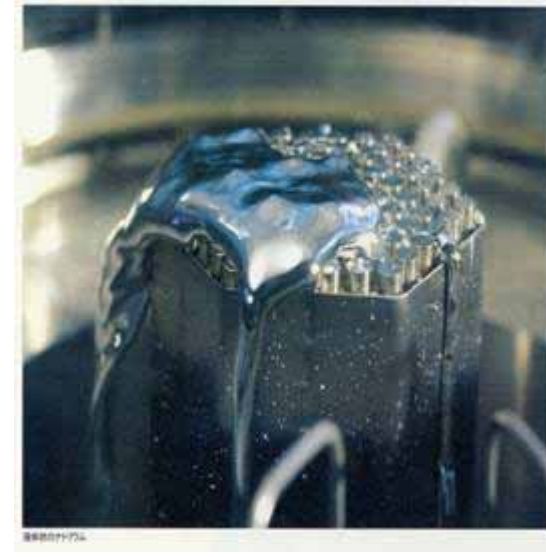
沸点は約881.5 (大気圧)であり、**広い温度範囲内で液体**状態である。



水より軽い金属



ナイフで簡単に切れるナトリウム



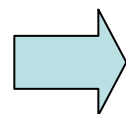
液体状のナトリウム

ナトリウムと水の反応

ナトリウムと水が反応すると**水素ガス**、**水酸化ナトリウム**と熱を生じる。



反応量が多い場合は反応熱によりナトリウムが着火(空気中の酸素と反応)し、発生した**水素**は空気中の**酸素と混合して爆鳴気**を作り、着火したナトリウムが発火点となり、爆発現象が生じる。また、反応量によっては、反応熱による水素ガスの急激な体積膨張を伴う。



【ナトリウムと水の反応】

各種液体金属の比較（物理的性質、核特性、工学的特性、価格）



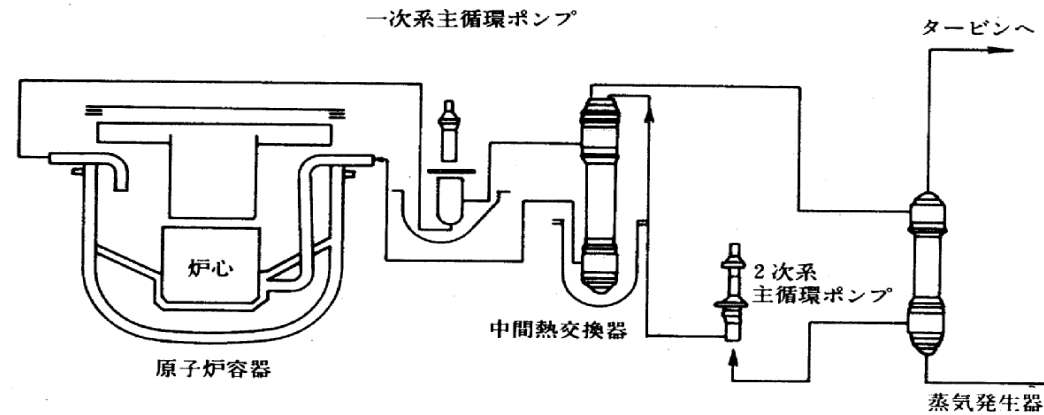
University of Fukui
(eutectic)

	Na	K	NaK (70/30)	Li	Pb	Bi	Pb/Bi (eutectic)	Hg
融点()	97.5	62.3	40	186	327.4	271.3	125	-38.9
沸点()	881	758	825	1317	1737	1477	1670	357
蒸気圧(600)(mmHg)	26	128		5×10^{-2}	3×10^{-4}	6×10^{-4}		22(atm)
中性子吸収断面積								
熱中性子(barns)	0.505	2.07		71	0.17	0.034		380
高速中性子(100eV)(mb)	1.1	5(400eV)		1000	4	3		60
半減期	15hr.	12.5hr.		0.8sec.	3.3hr.	5days		5.5min.
熱伝導度 (600)(cal/cm/sec/)	0.15	0.084		0.07	0.036	0.037		0.02
比熱(600)(cal/g/)	0.3	0.183		1.0	0.038	0.038		0.03
比重(600)(g/cm ³)	0.81	0.7		0.47	10.27	9.66		12.2
キャピテーション流速(ft/sec.)	35	38	38	47	10	11	10	9
熱輸送能力 (4in. 管)(C.H.V./ft ² sec.)	3.4	1.9	1.2	8.8	1.2	1.3	1.2	1.4
ポンプ力(1/ ² c ³)	47	29.2	78	4.2	178	238	233	169
価格(£/ft ³)	3	42	16	120	40	500	300	730

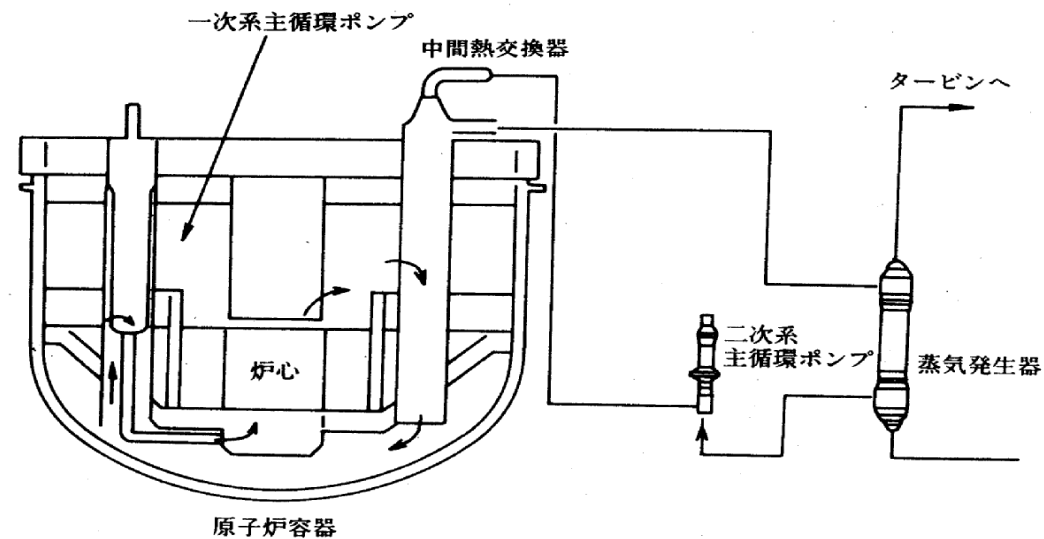
ナトリウム冷却高速増殖炉の炉型



University of Fukui



ループ型

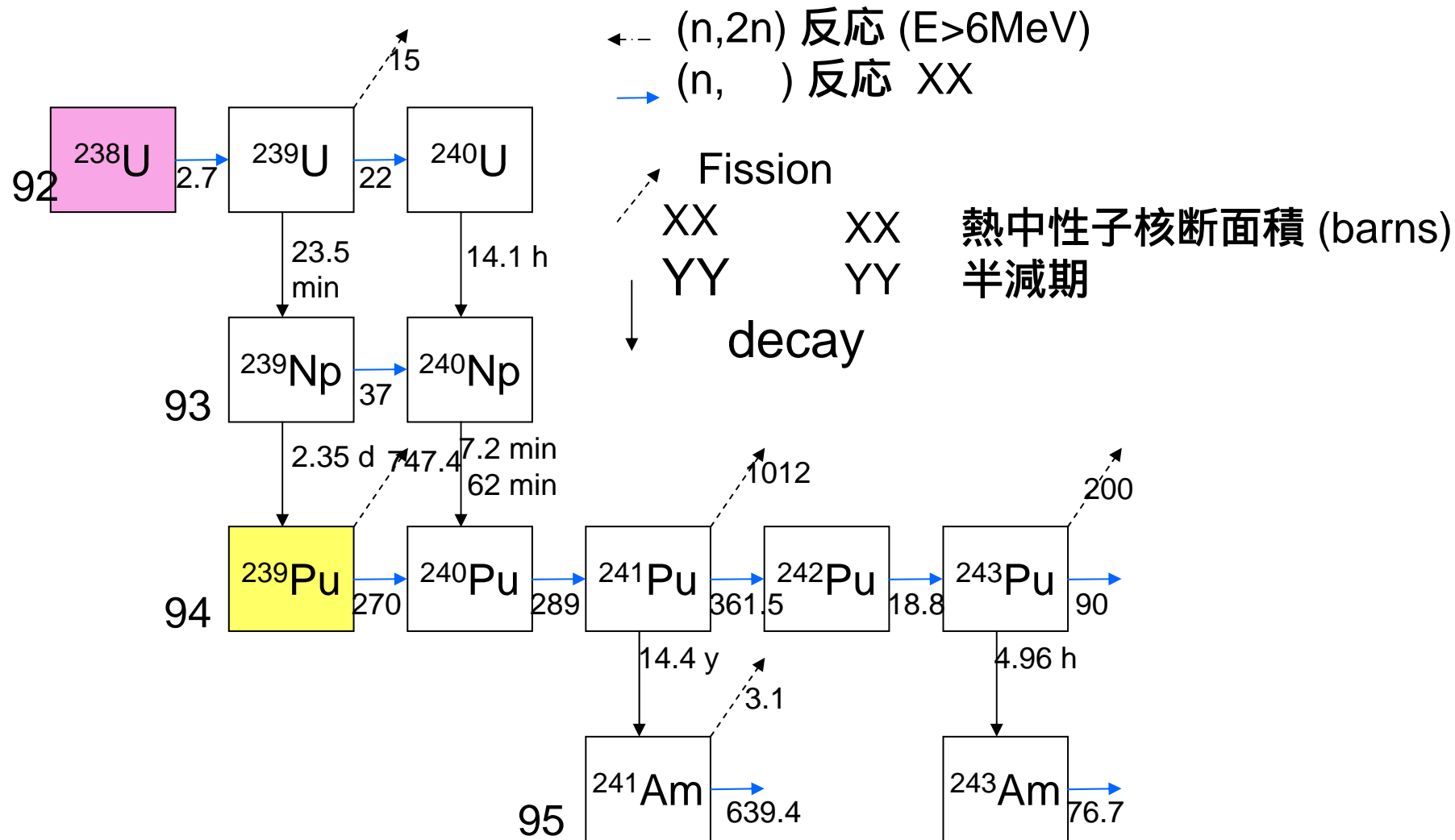


タンク型

高速中性子による照射チェーン



University of Fukui

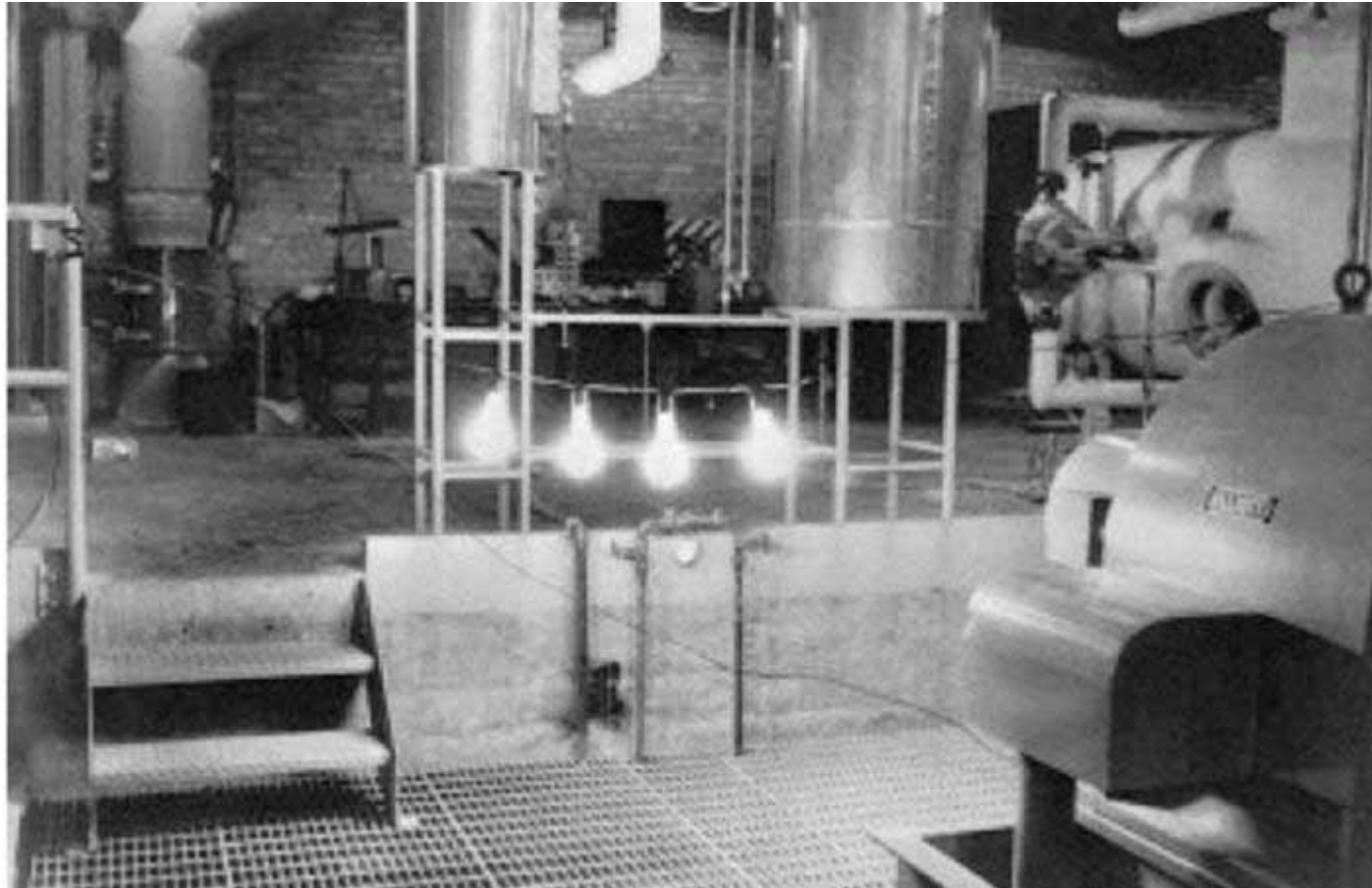


世界初の発電炉



University of Fukui

世界で初めて発電に成功した高速炉EBR - I
(その時、灯された4つの電球) 1951年12月20日



Phénix



University of Fukui

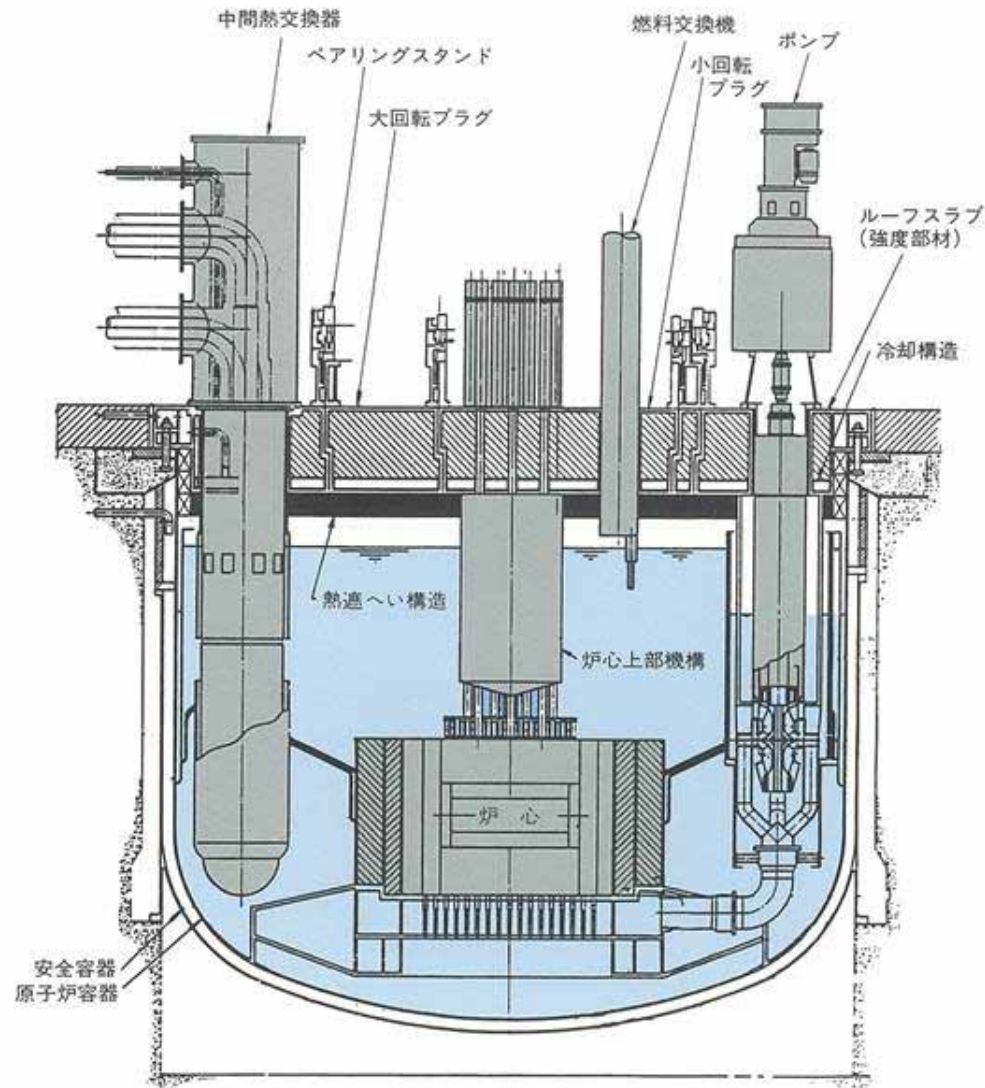
フランスで最も古い発電炉



タンク型高速増殖炉 (Phénix)



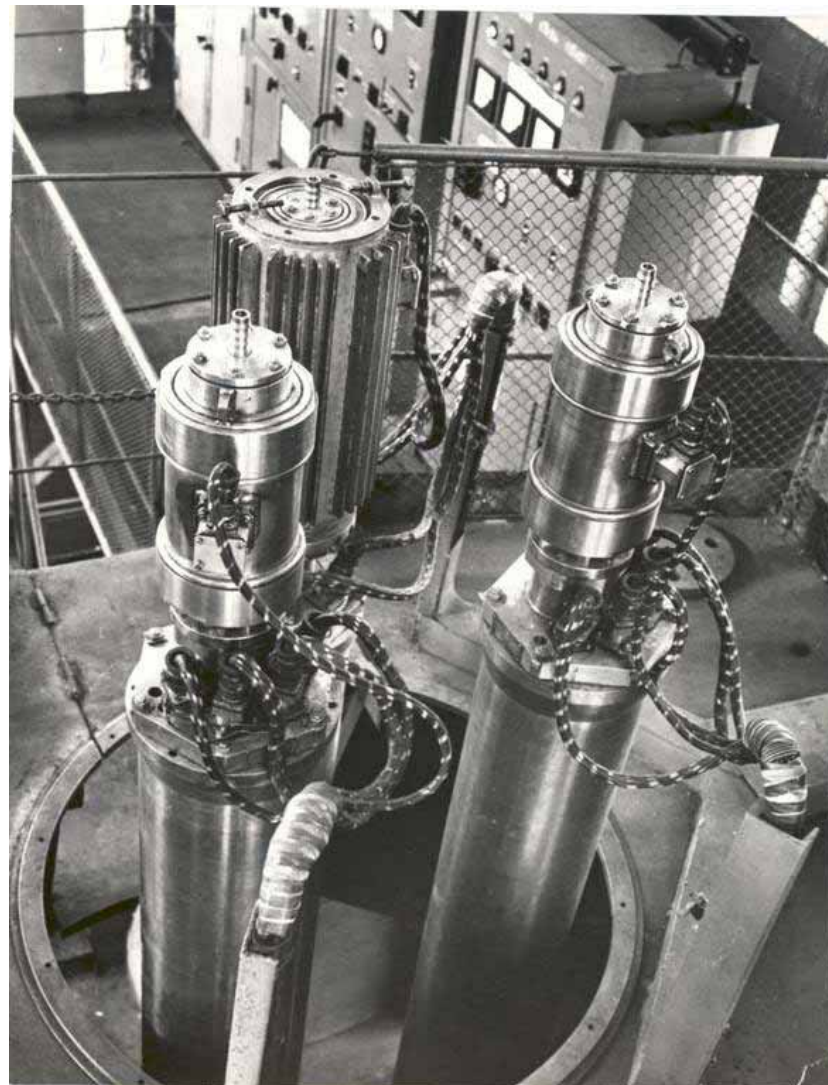
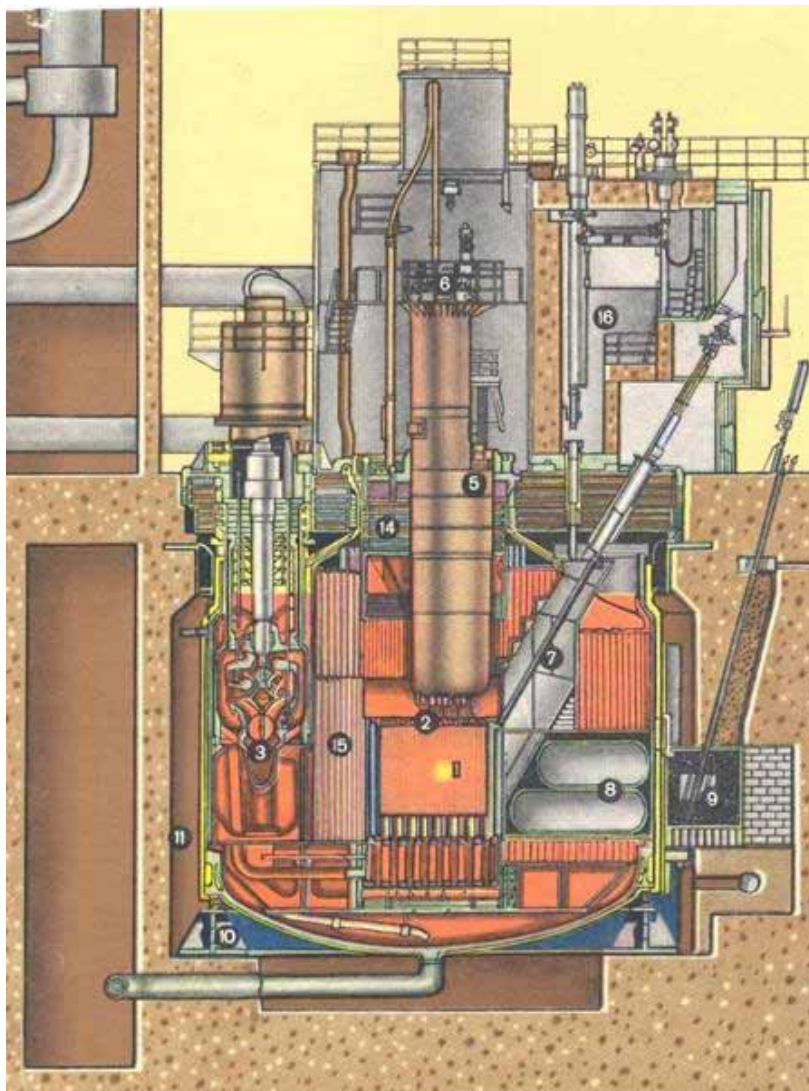
University of Fukui



BN600



University of Fukui

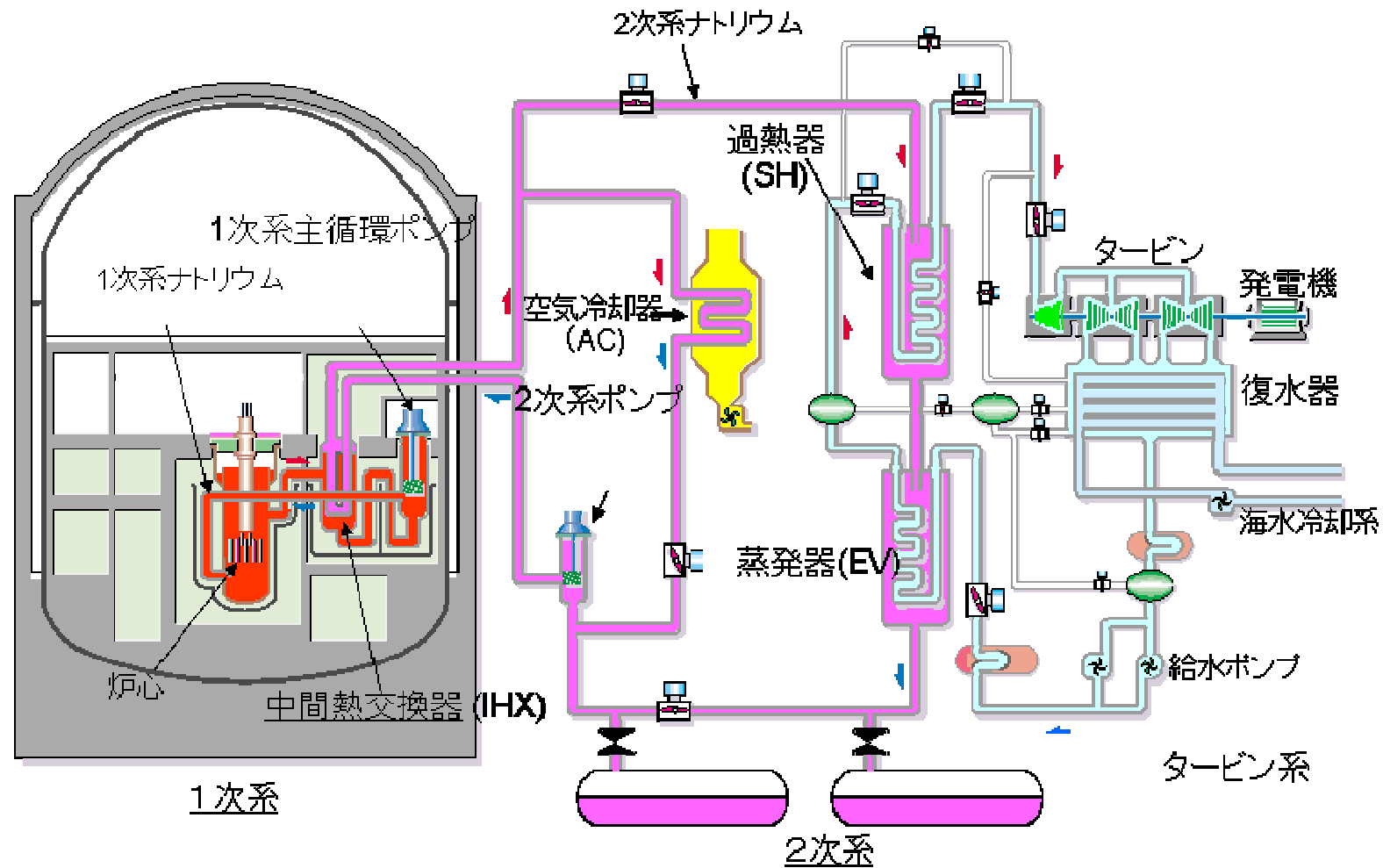


IAEA-TECDOC-1531より

ループ型高速増殖炉「もんじゅ」



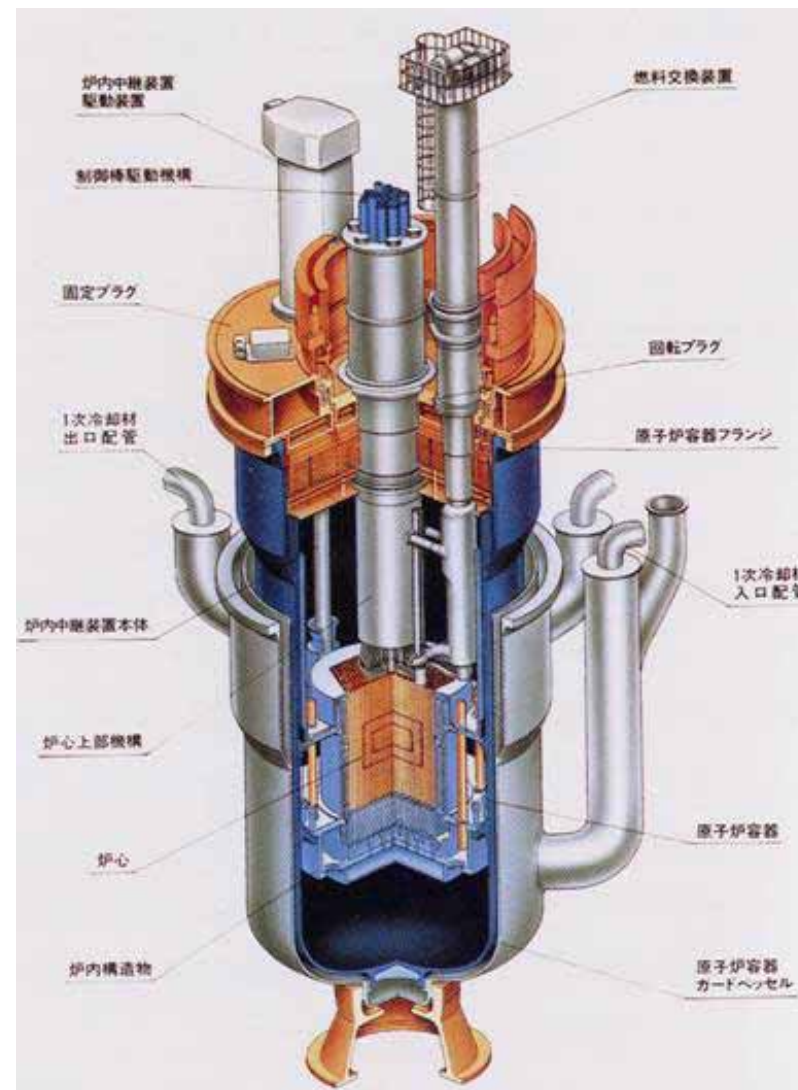
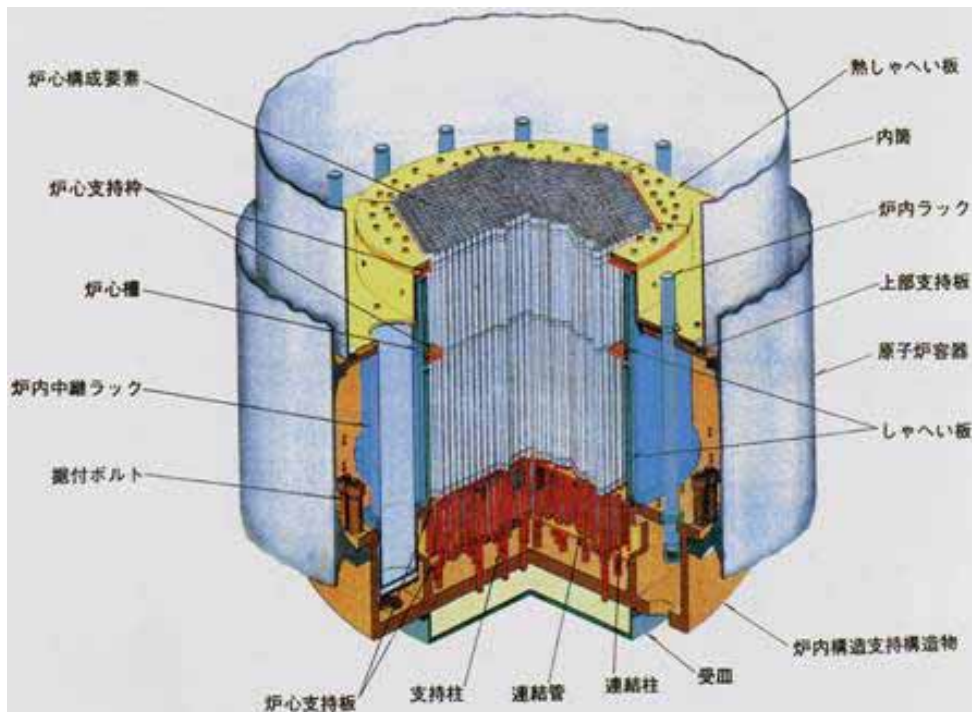
University of Fukui



「もんじゅ」の炉心



University of Fukui



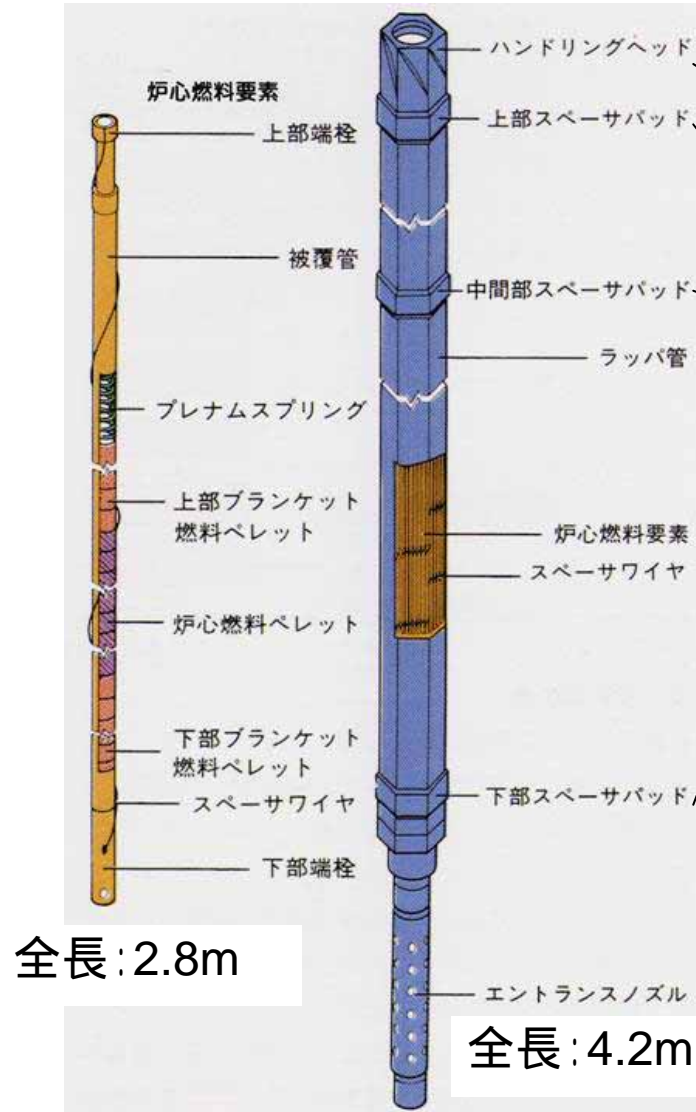
Coolant inlet

Coolant inlet

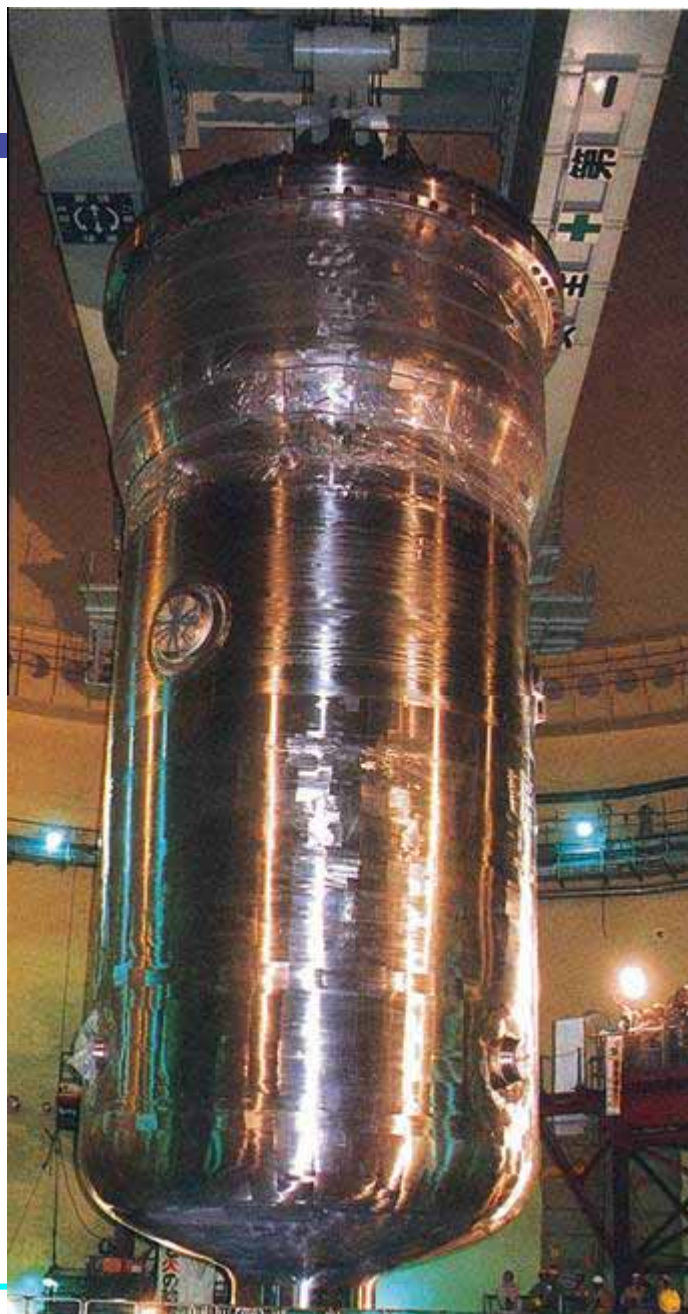
燃料集合体



University of Fukui



- 燃料交換の操作用(燃料交換機の爪を挿入)
- 隣接する集合体との間隔の保持
- 燃料要素の冷却流路を確保、燃料要素の保護
- 冷却材の流入孔。炉心支持板側の構造とあいまって、冷却材の流量調整を行う。流路閉塞防止のため多数の流入孔。

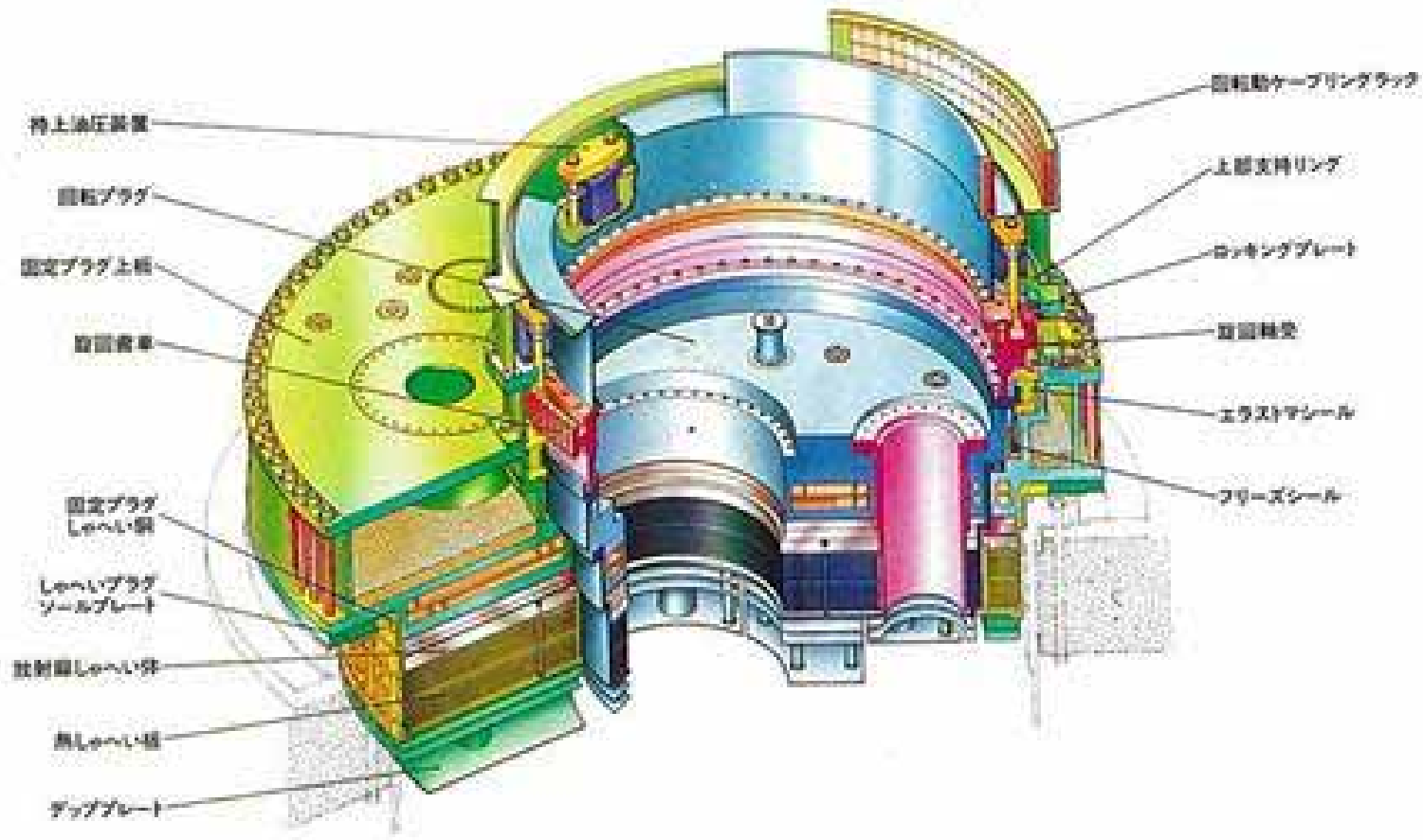


「もんじゅ」の原子炉容器の吊り込み

遮蔽プラグ



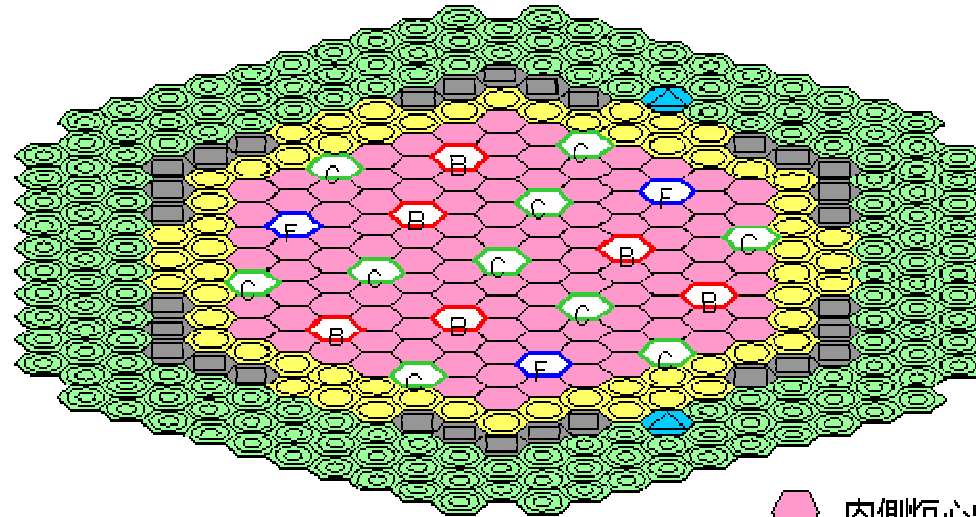
University of Fukui





「もんじゅ」初装荷炉心



University of Fukui



-  内側炉心燃料
-  外側炉心燃料
-  プランケット燃料
-  ダミー燃料
-  中性子源
-  } 制御棒
-  }
-  }

負荷度約20%

負荷度約25%

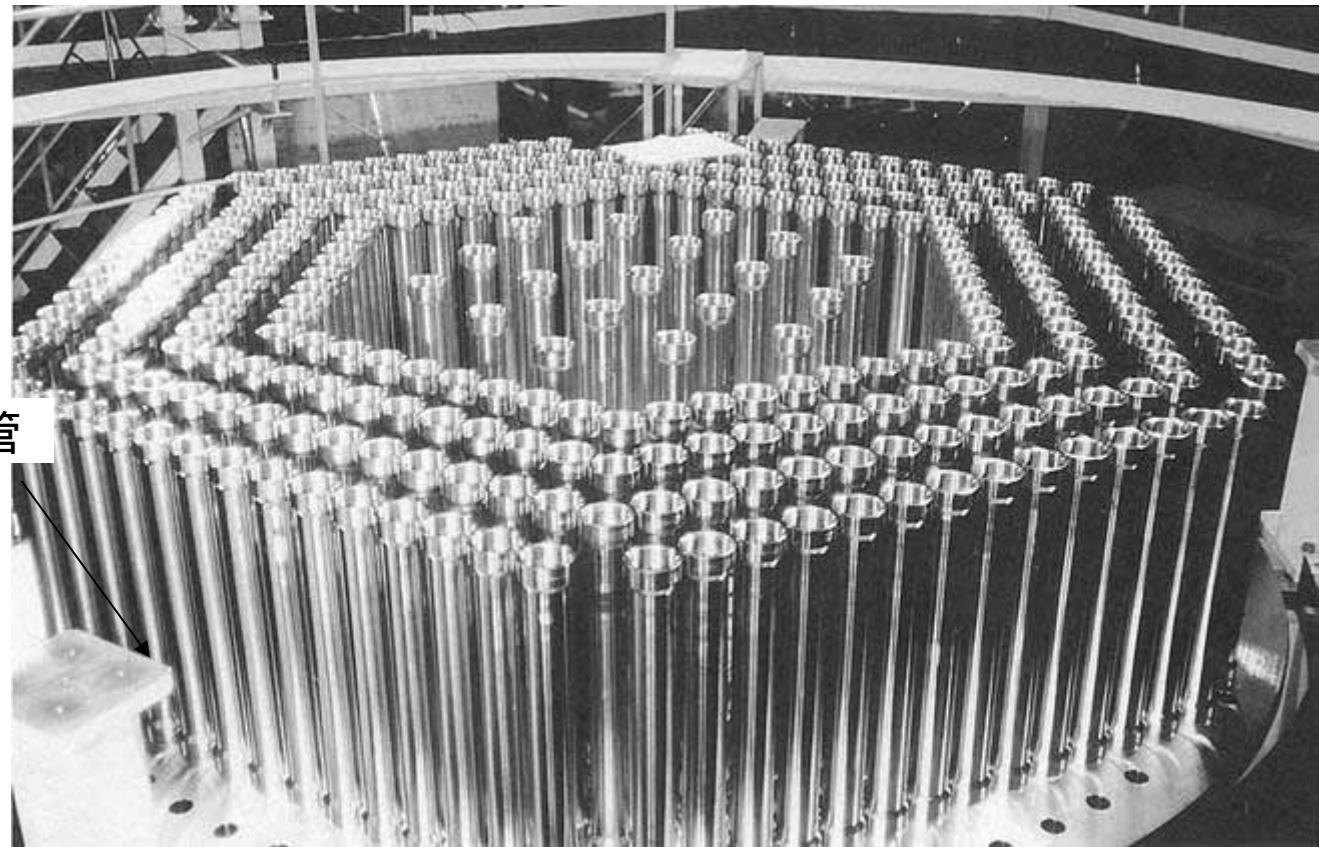
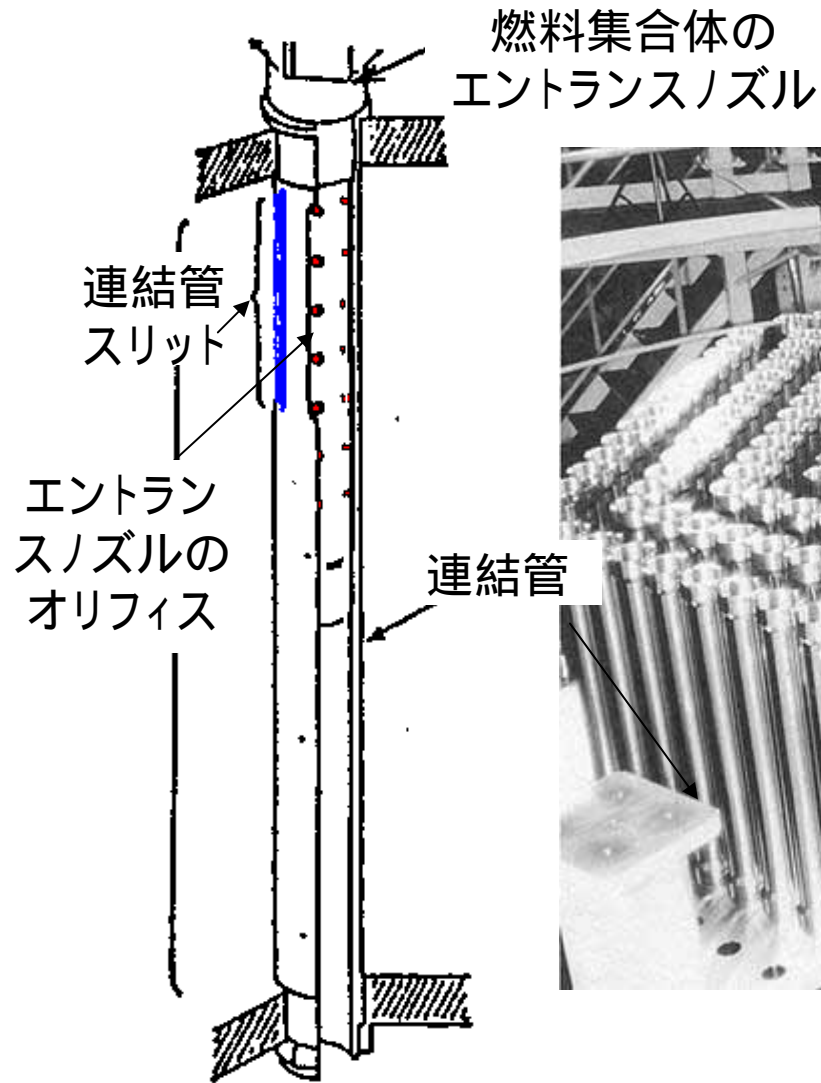
^{238}U

B_4C

炉心流量配分機構



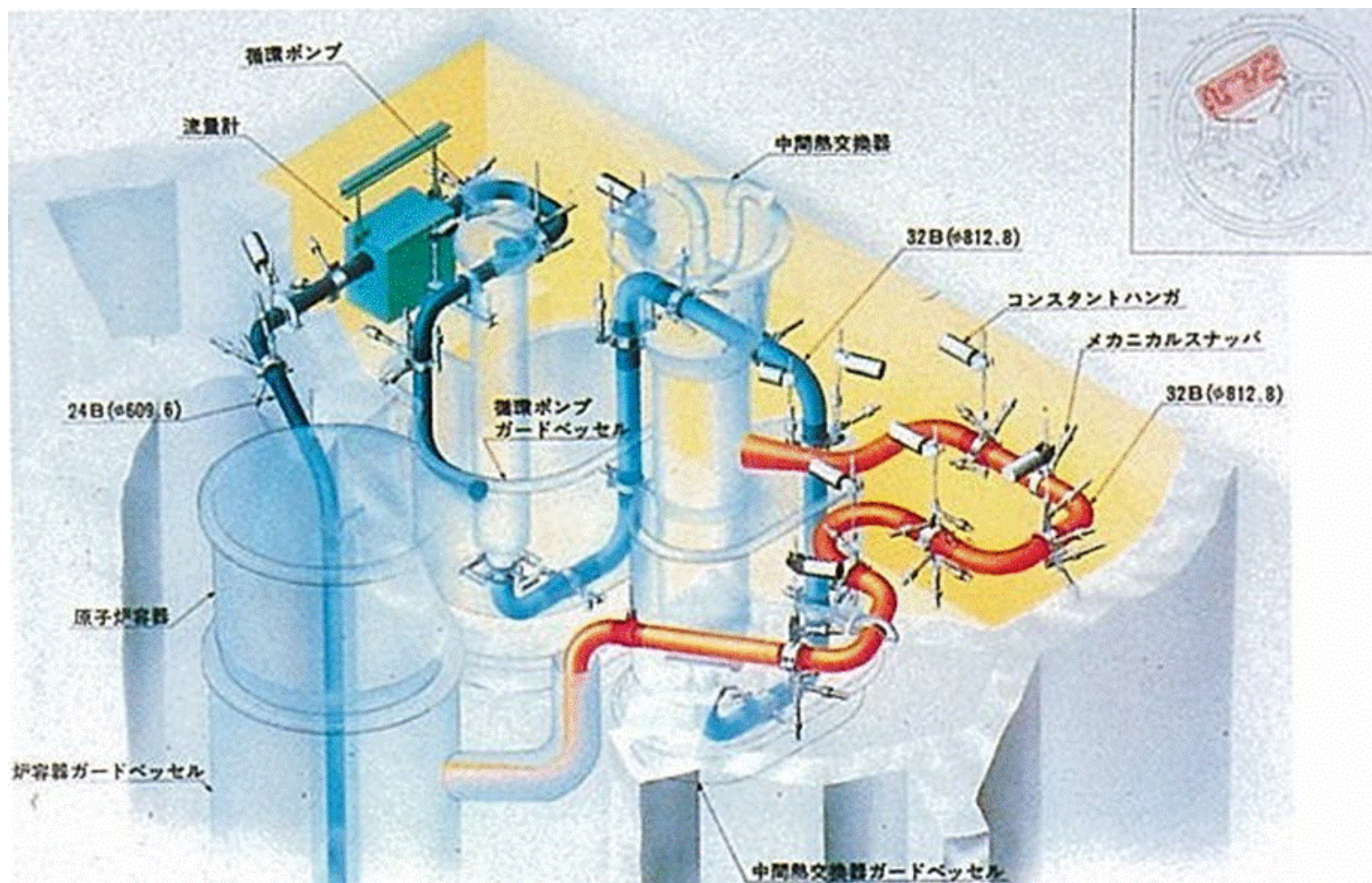
University of Fukui



一次系配管の引き回し



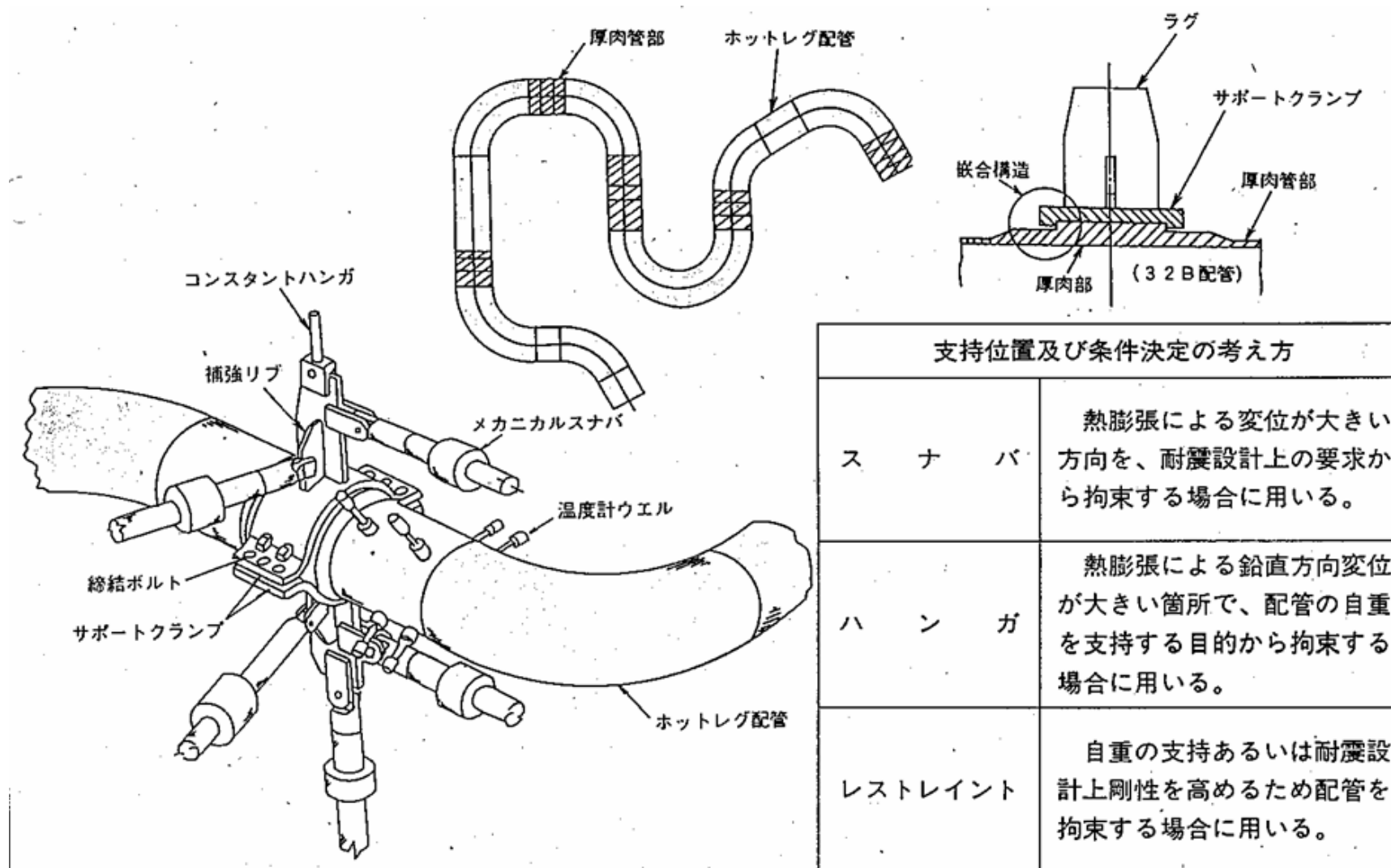
University of Fukui



耐震性のためのサポート構造



University of Fukui

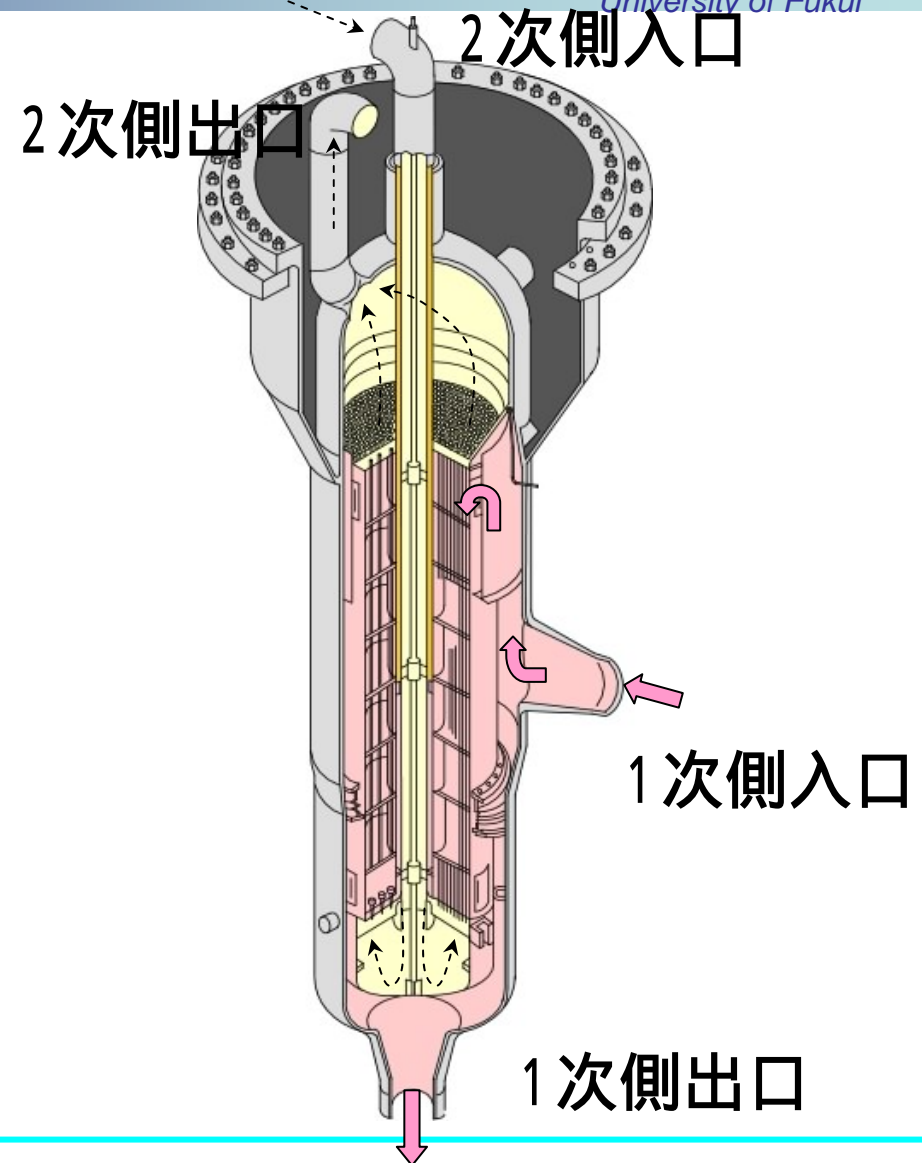


中間熱交換器



University of Fukui

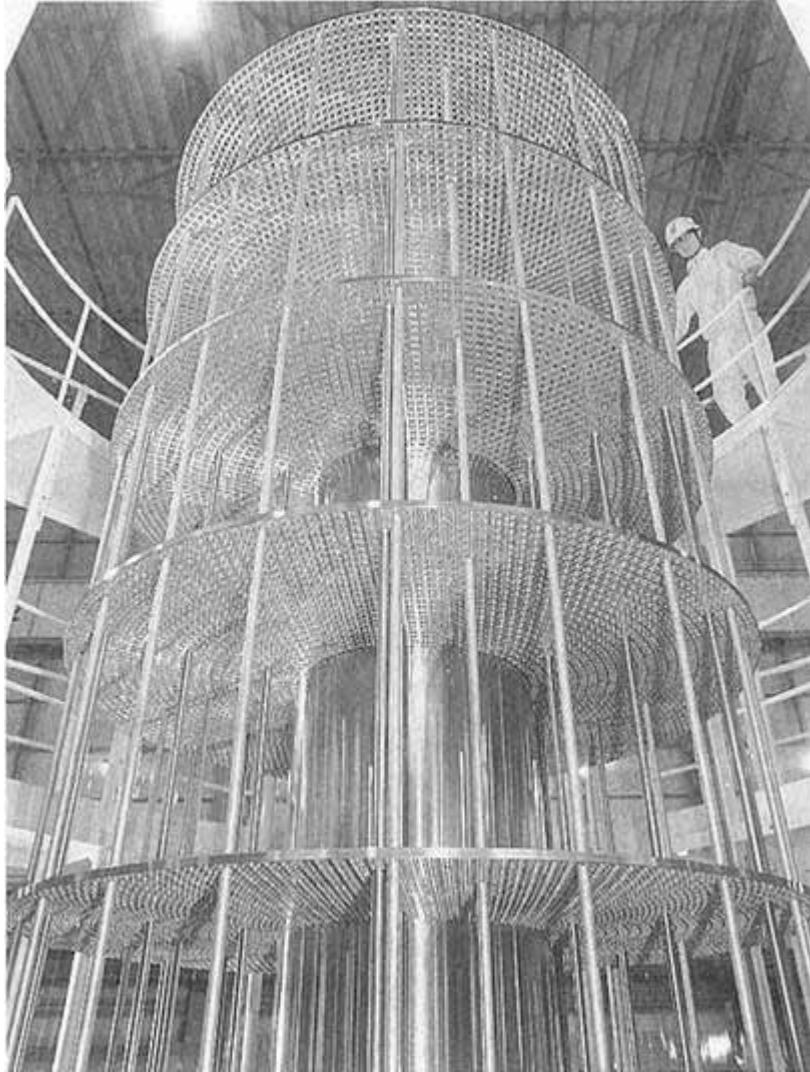
	1次側	2次側
流量	5120t/h	3730t/h
入口温度	529	325
出口温度	397	505
伝熱管形状	外径21.7mm、肉厚1.2mm、長さ6.07m	
伝熱管本数	3294本	
交換熱量	238MW	
全高	12.1m	



中間熱交換器の搬入



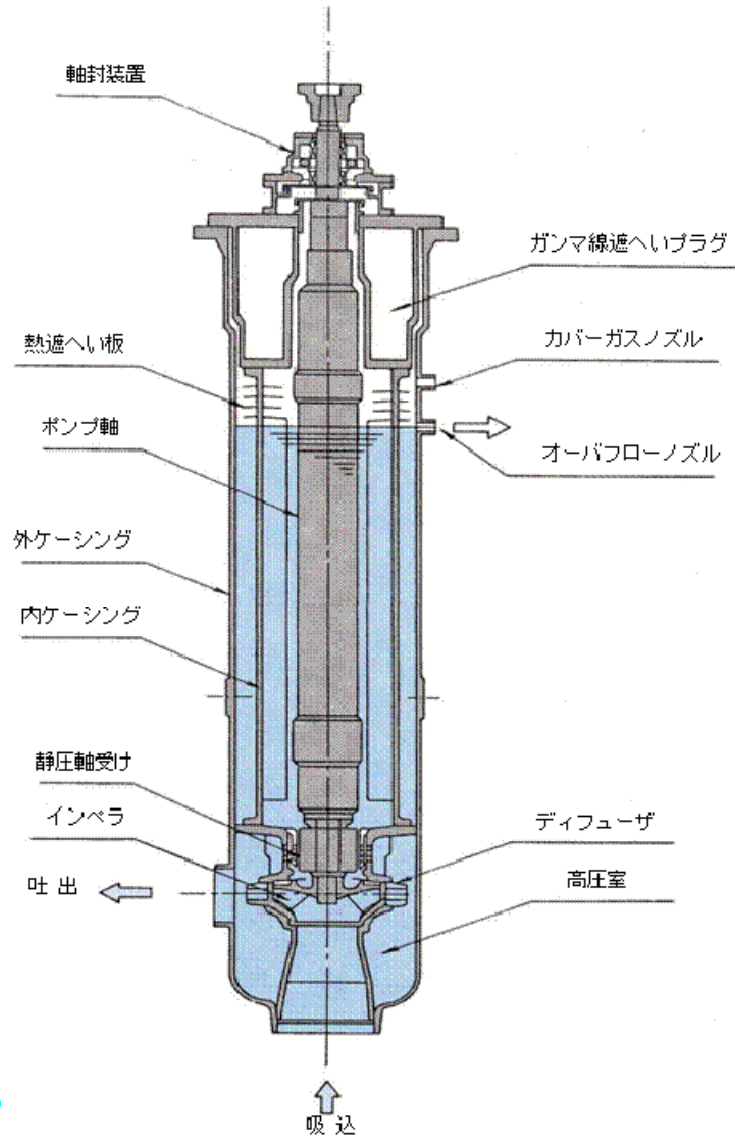
University of Fukui



1次主循環ポンプ



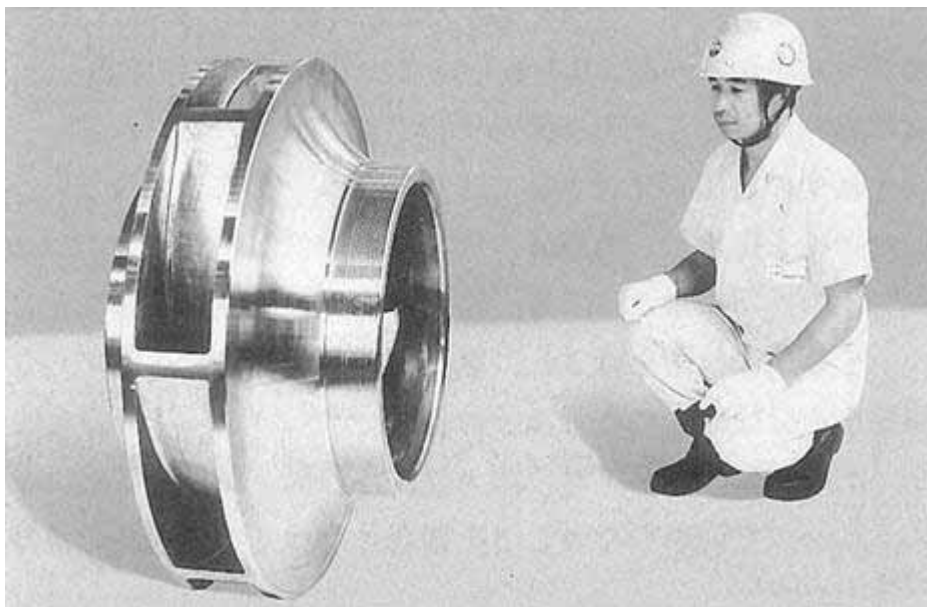
University of Fukui



1次主循環ポンプ



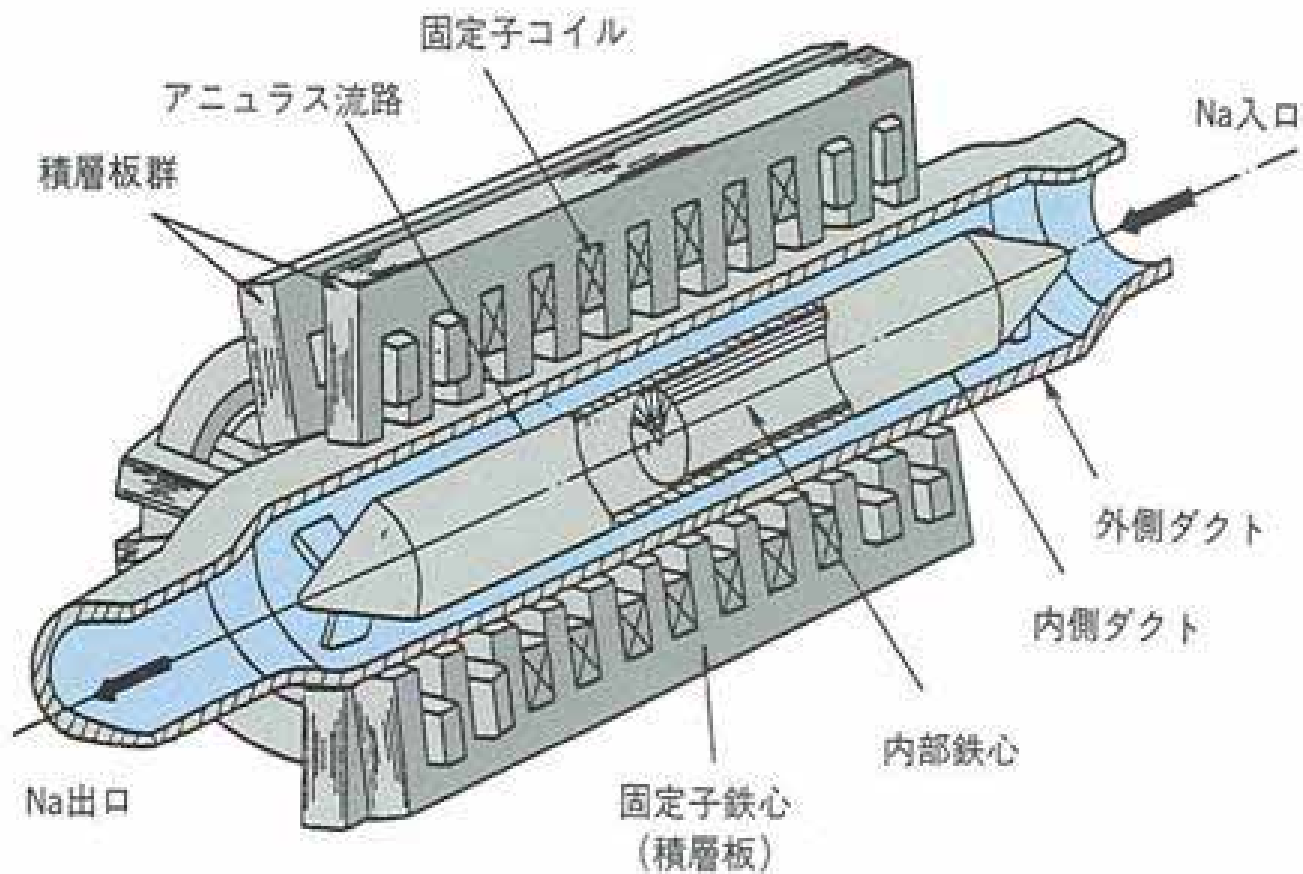
University of Fukui



電磁ポンプ



University of Fukui

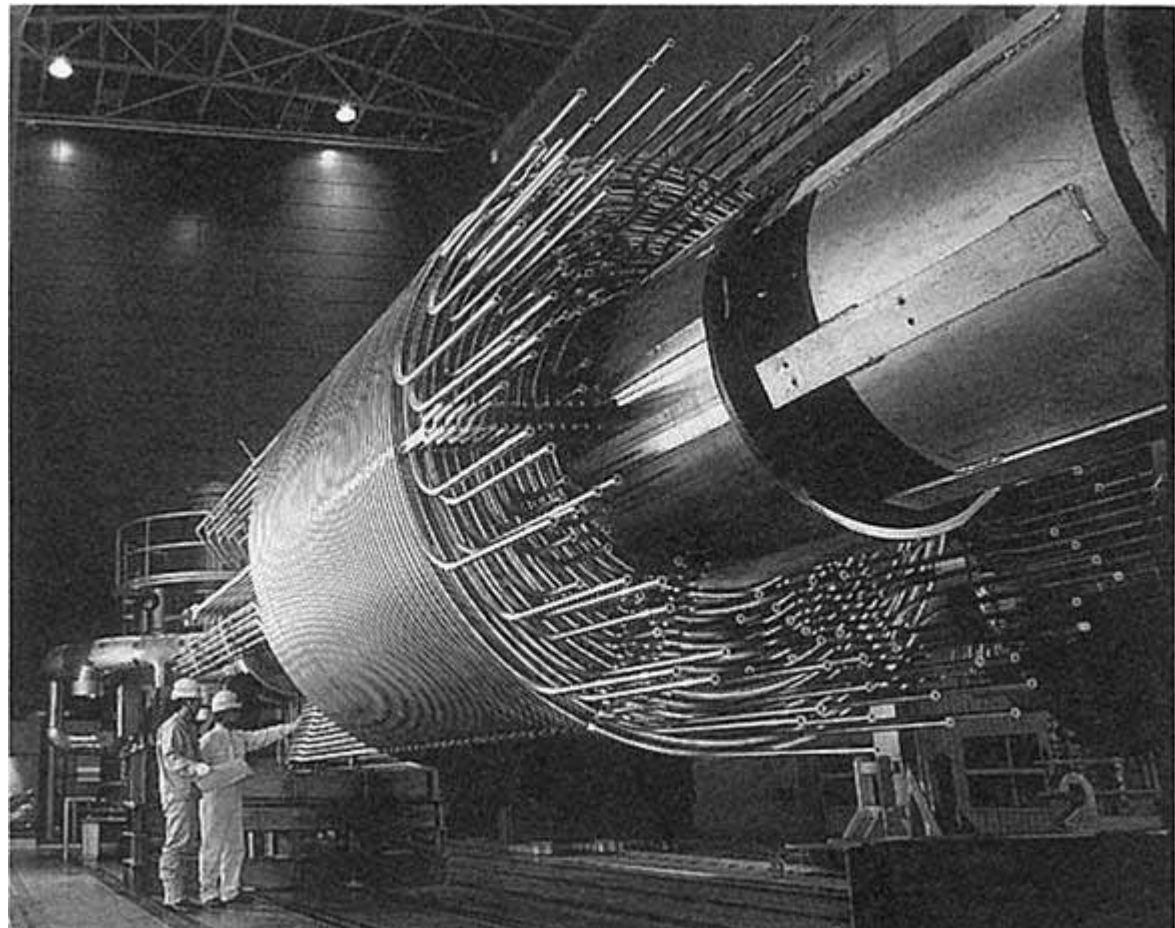
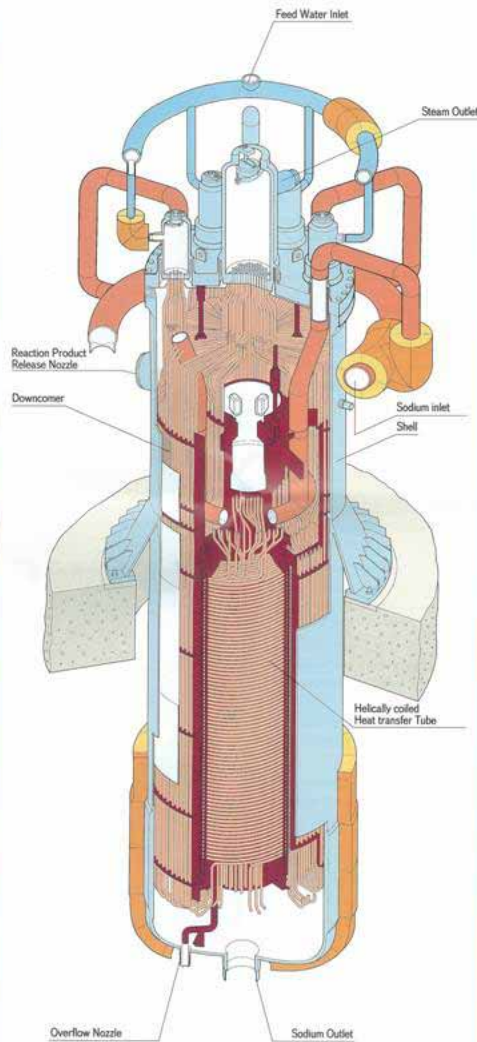


蒸気発生器



University of Fukui

SG/ Evaporator (EV)



50MW SG施設で使用した蒸発器



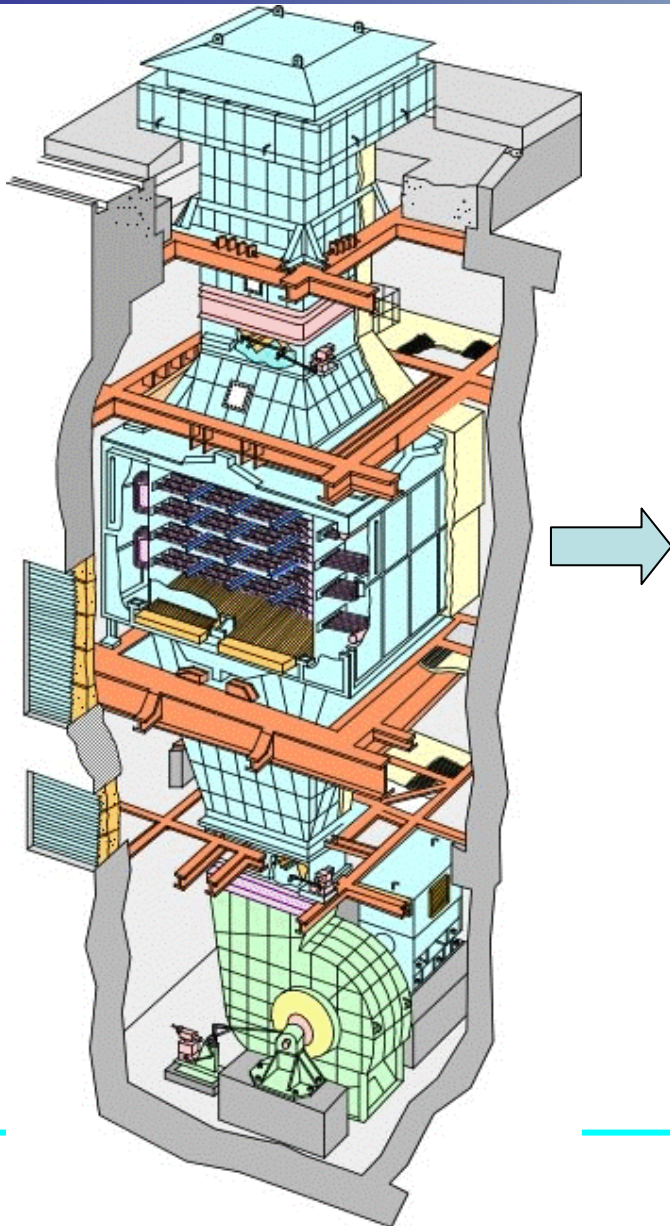
University of Fukui



空気冷却器



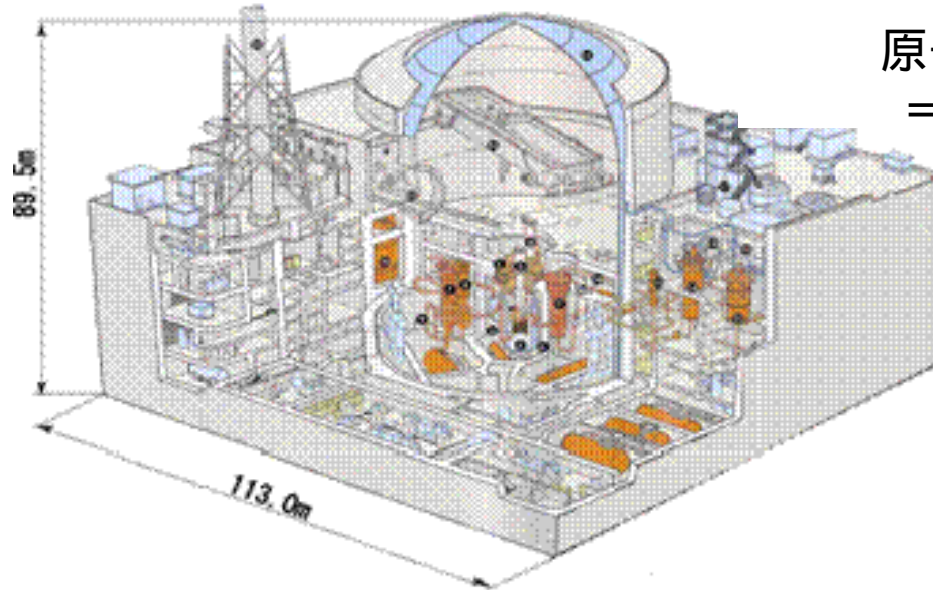
University of Fukui



高速増殖炉を小型化する



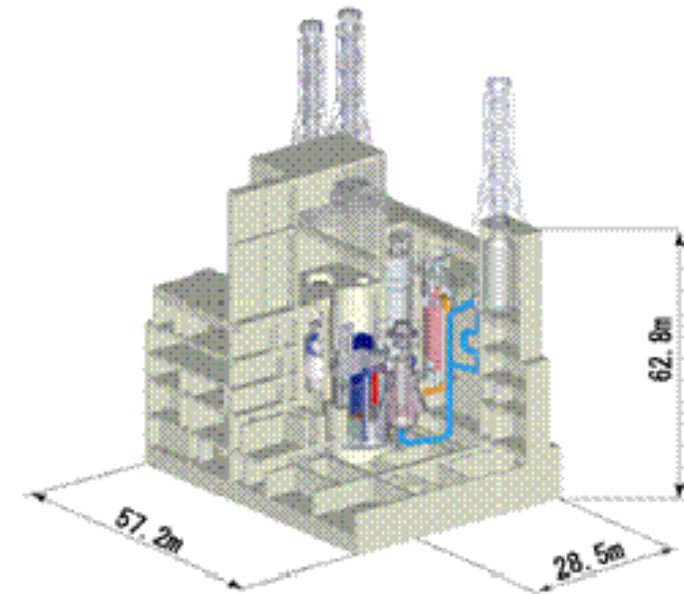
University of Fukui



原子炉建屋容積
= 810,000 m³

FBR原型炉「もんじゅ」

熱出力 714 MWt
電気出力 280 MWe



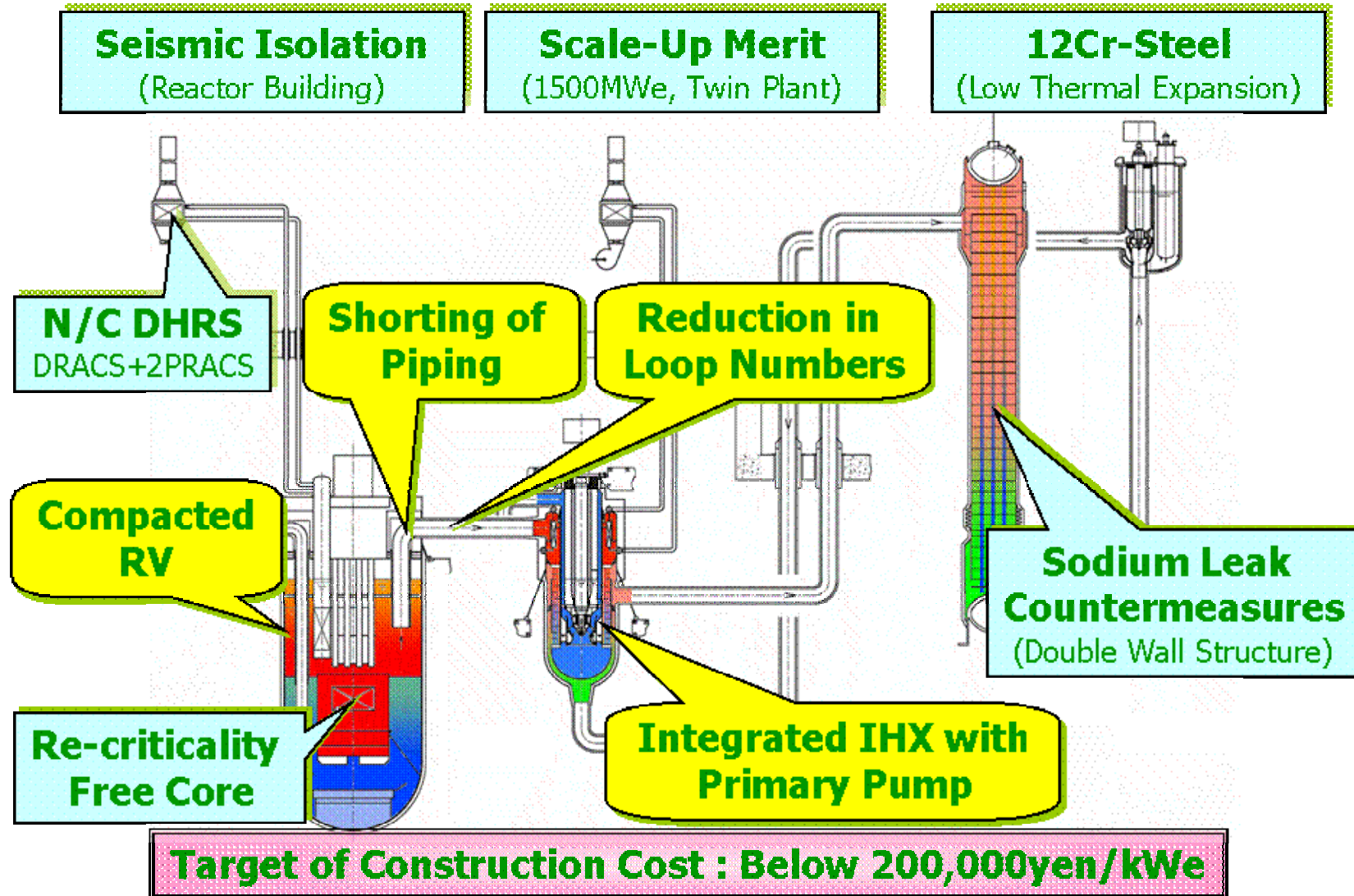
大規模革新型 FBR

熱出力 3570 MWt
電気出力 1500 MWe

JSFR



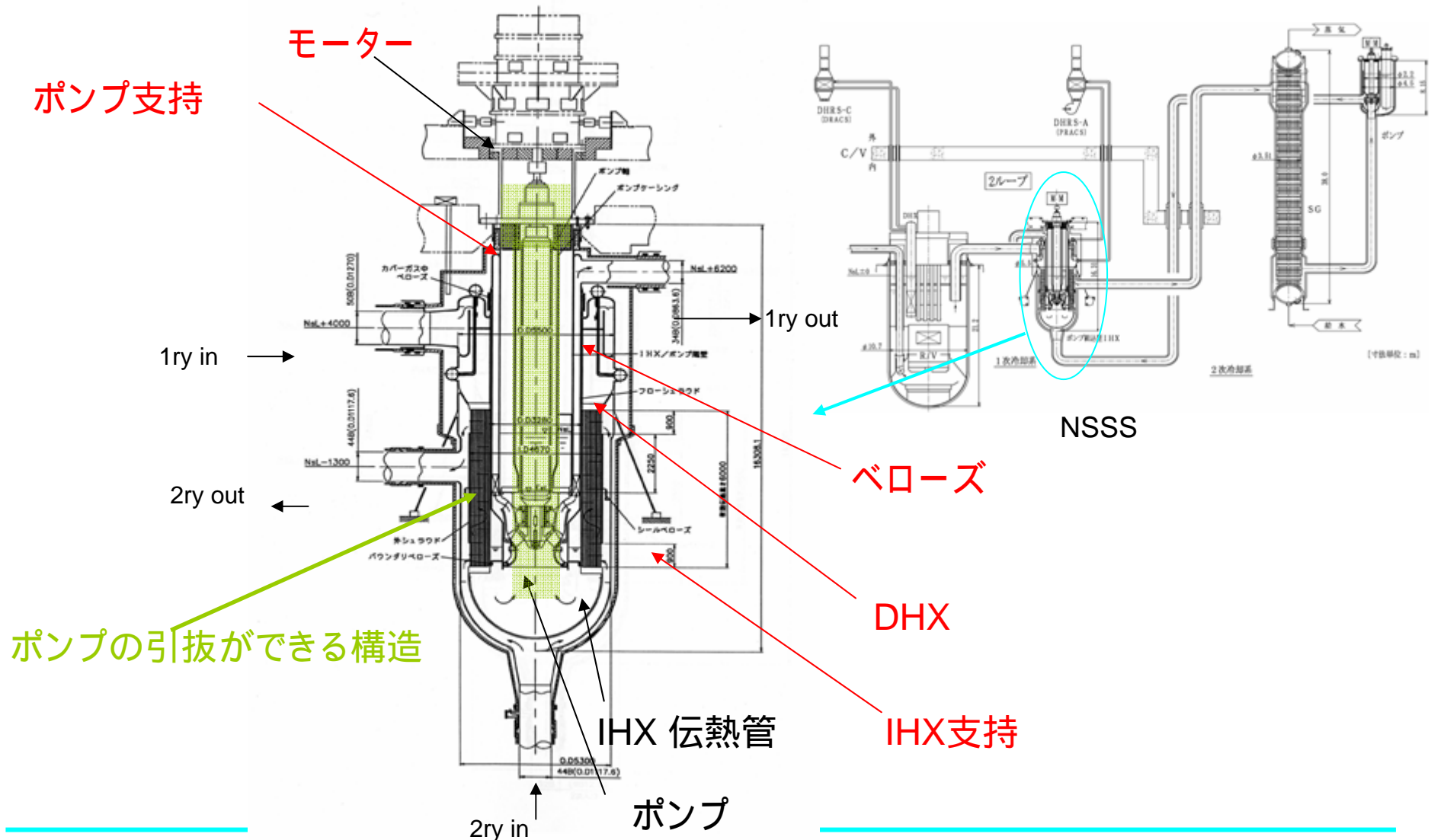
University of Fukui



中間熱交換器とポンプの機器合体



University of Fukui

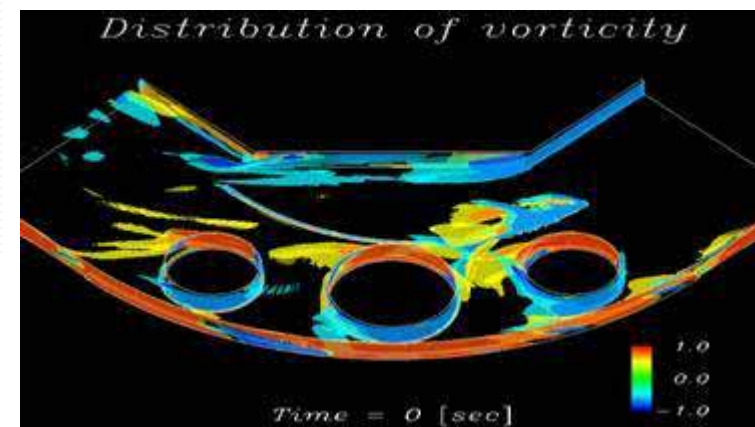
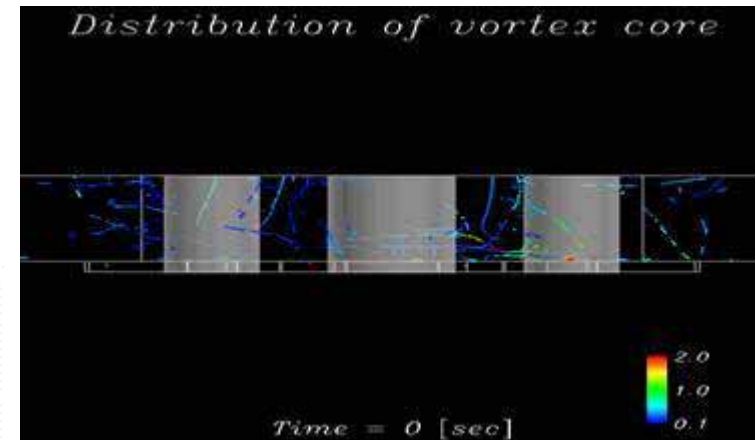
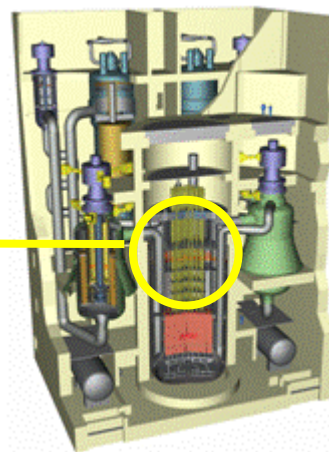
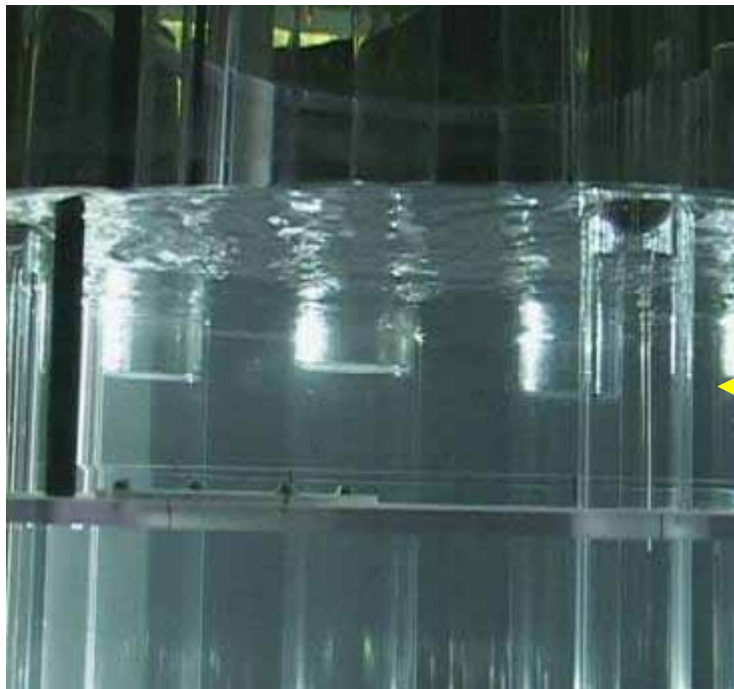


カバーガスの巻込み抑制



University of Fukui

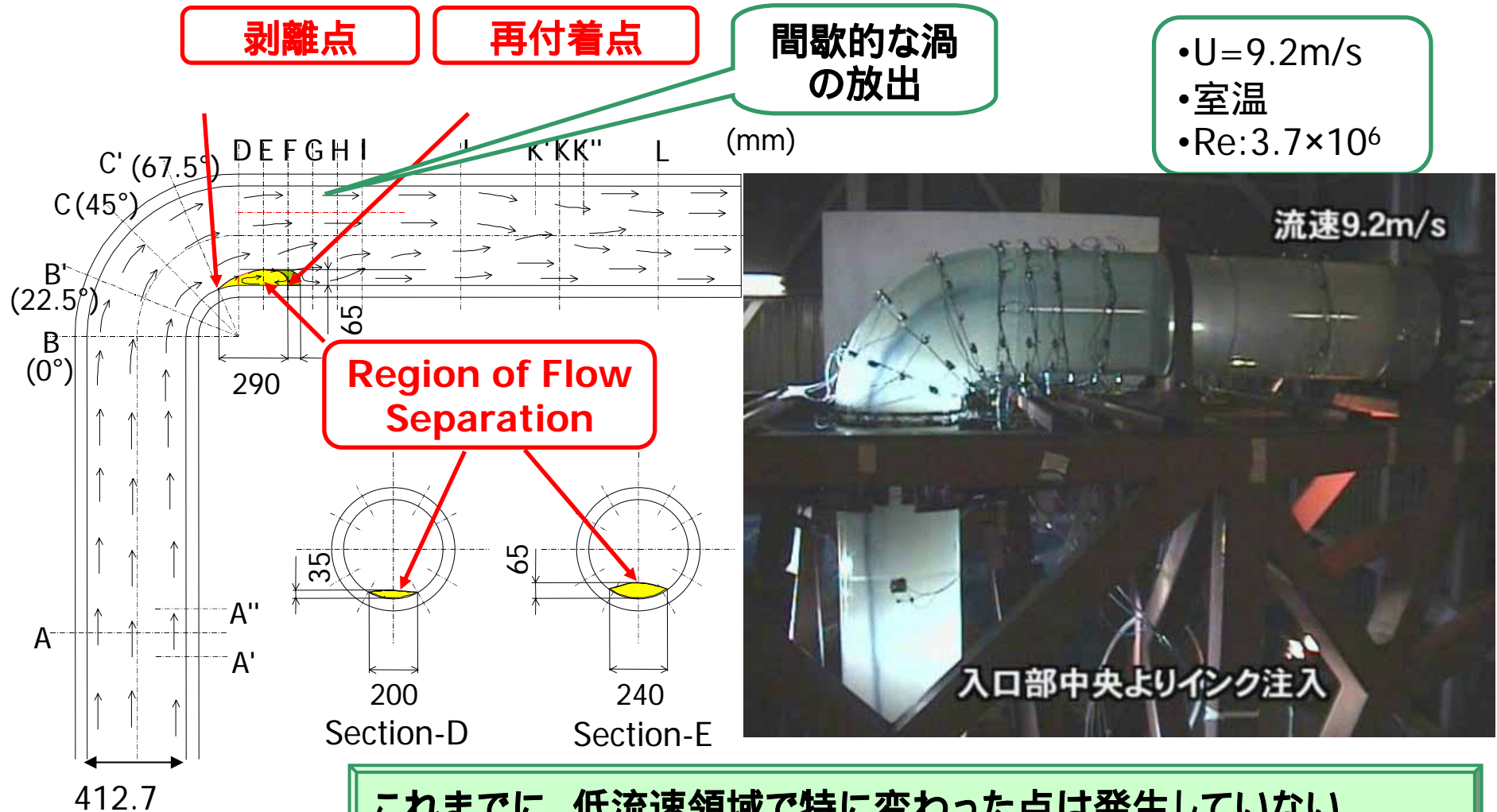
流動試験によって、コンパクトでも成立する炉心構造を研究



大口径配管



University of Fukui

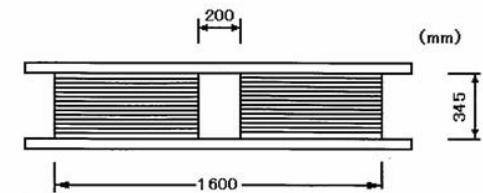
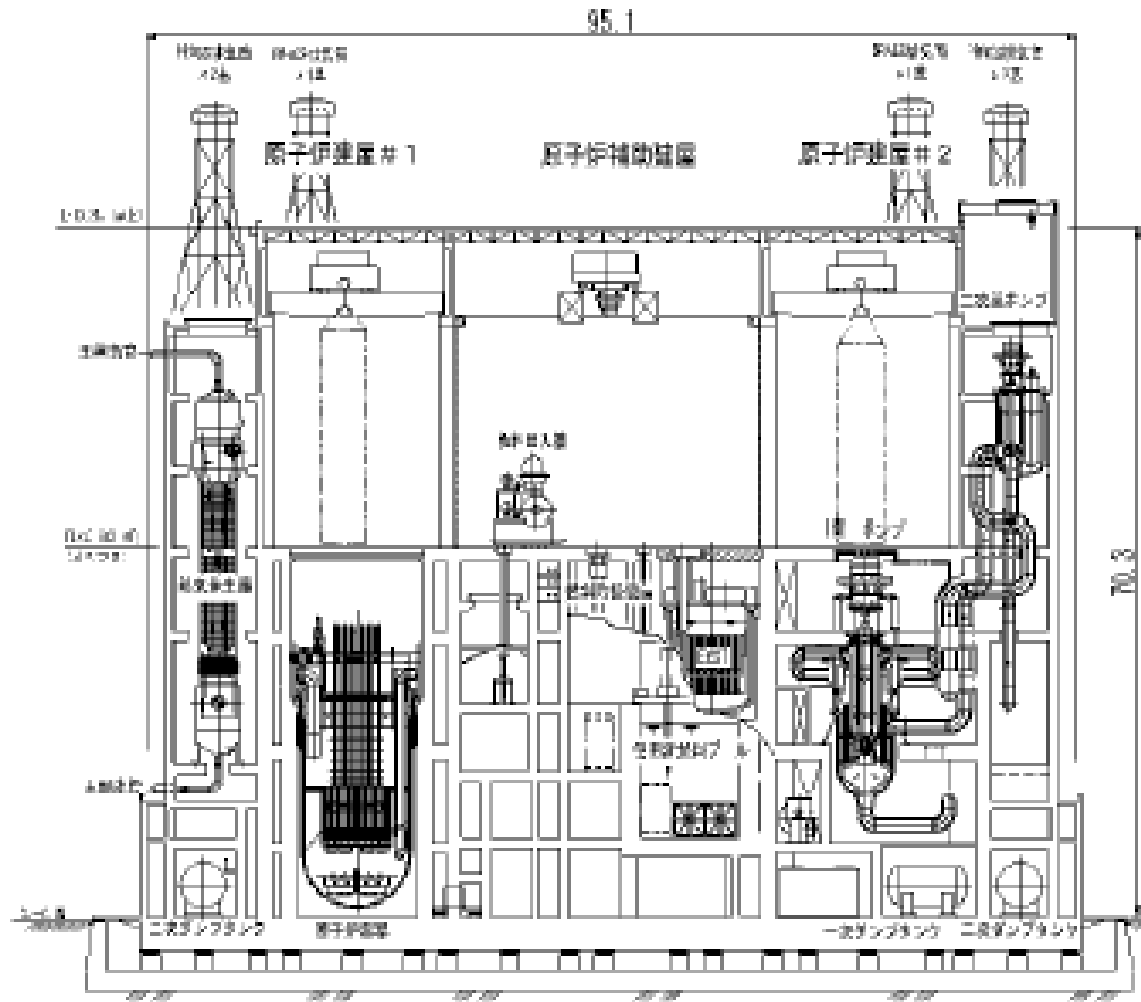


これまでに、低流速領域で特に変わった点は発生していない。
 → 流況と流速分布は Re 数とは無関係

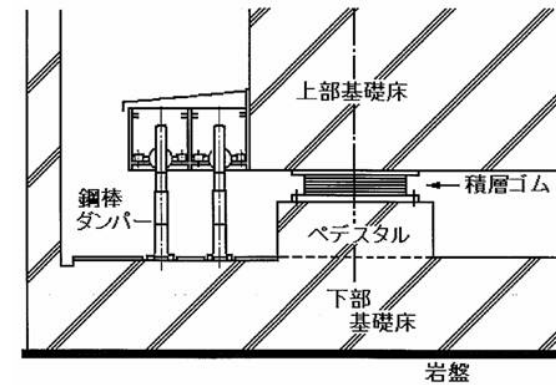
原子炉建屋免震



University of Fukui



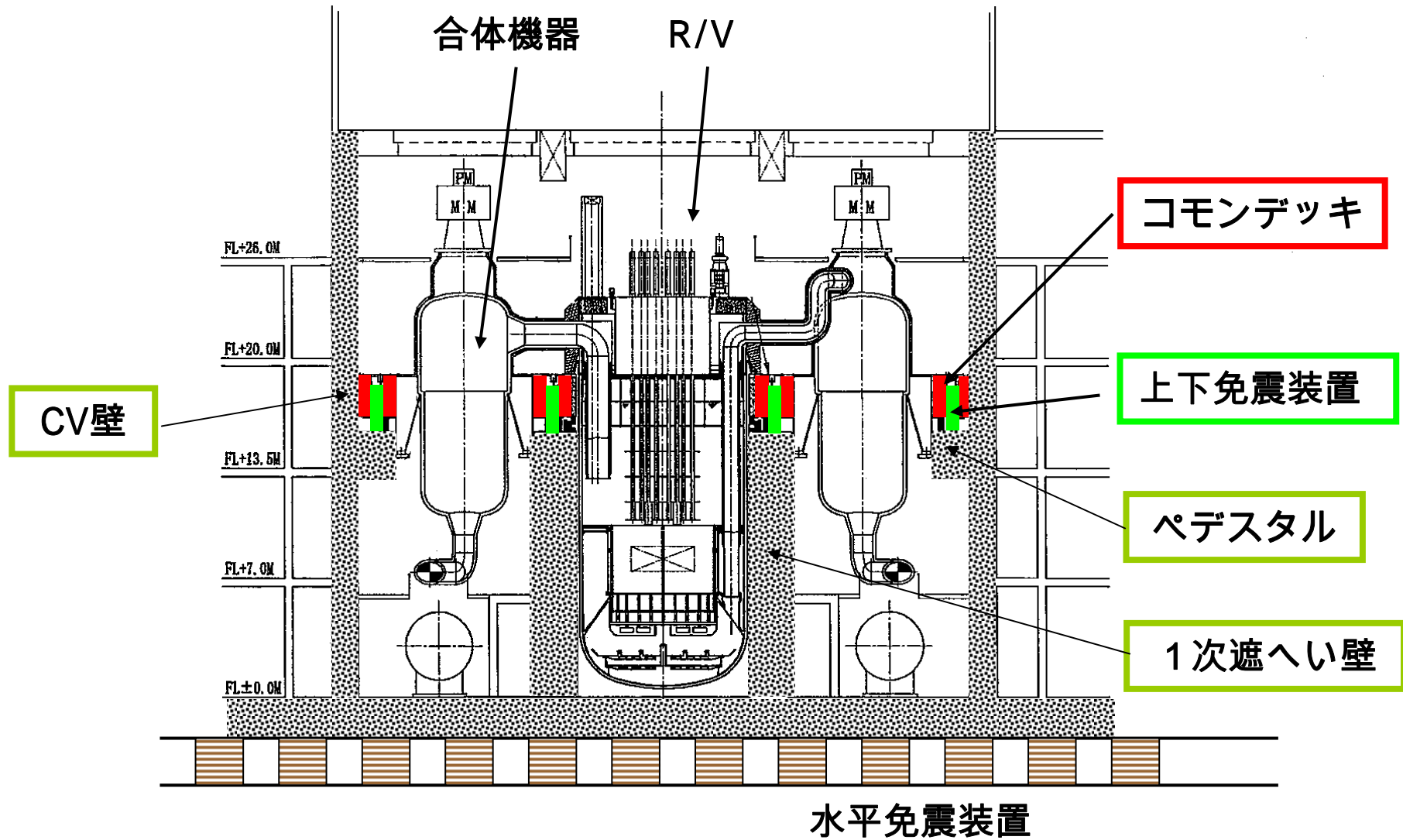
*全ゴム厚は225mm



機器免震



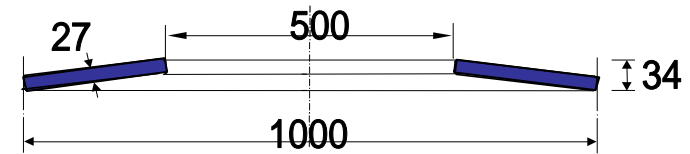
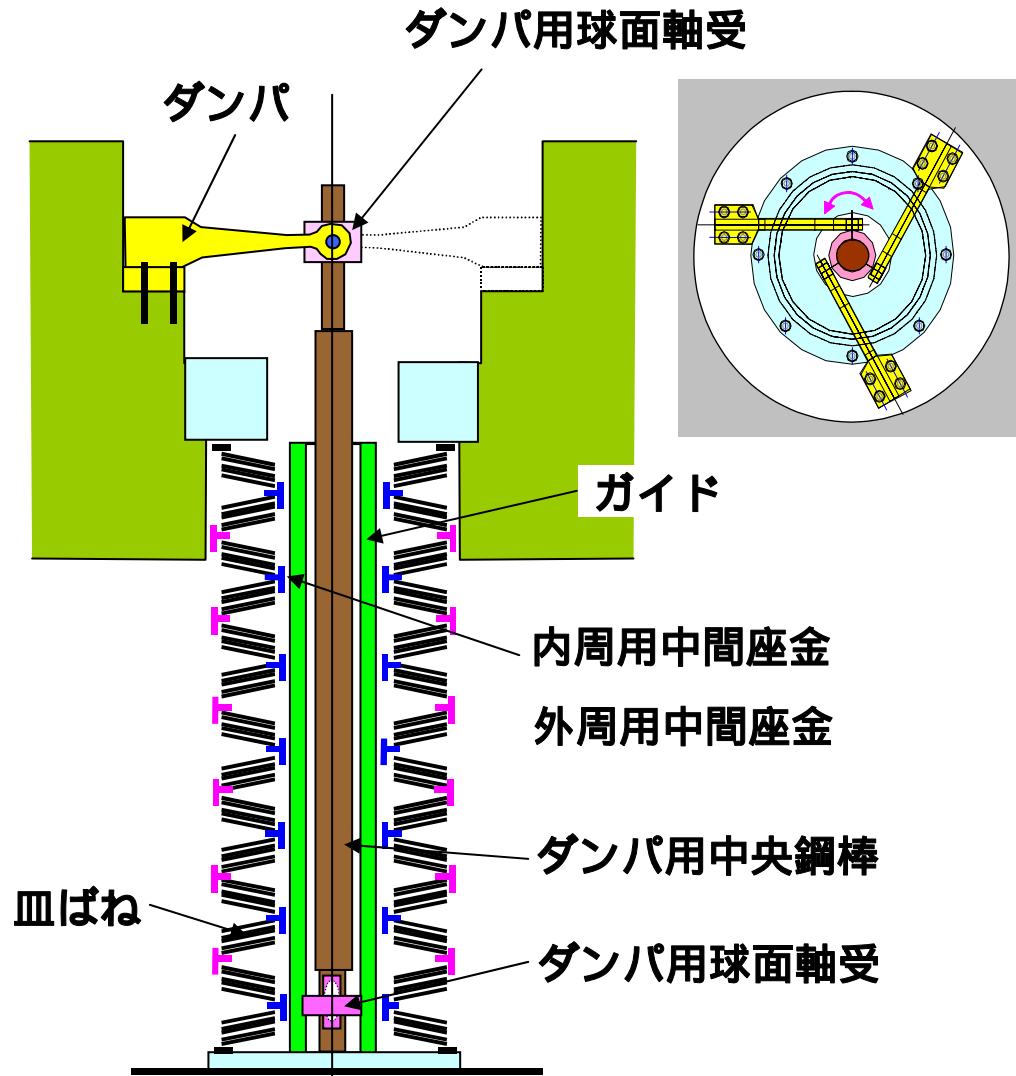
University of Fukui



上下免震装置の構造



University of Fukui



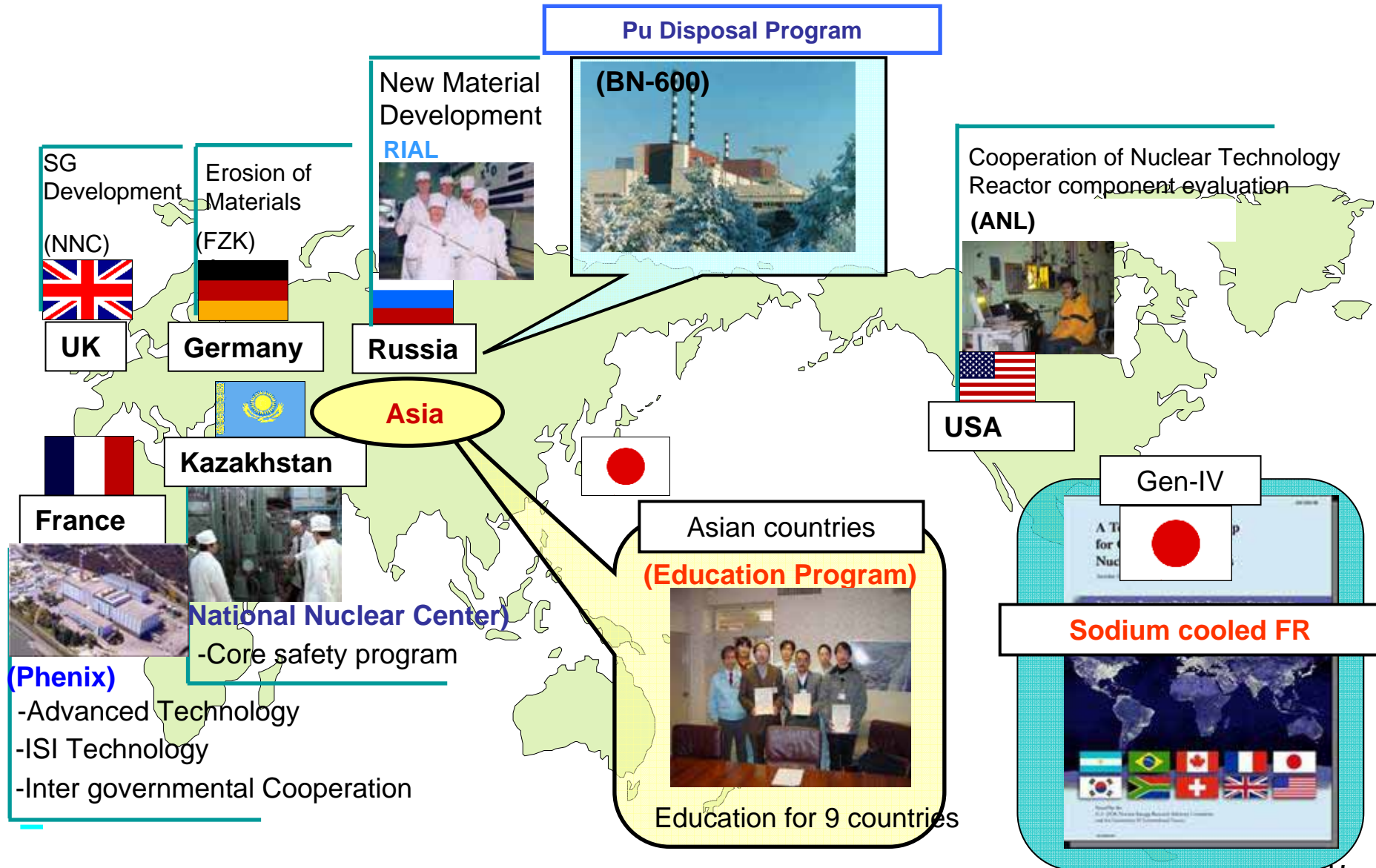
皿ばねの仕様

材料		SUP10
外径	mm	1000
板厚	mm	27
並列数 × 直列数		5 × 14
支持荷重	tonf	275
セット数		20
供用時高さ	m	2.4

国際協力



University of Fukui



将来の核燃料Thorium



University of Fukui

ガラパリ(ブラジル)でのリュウマチ治療



平均線量
44mSv/y



131mSv/y

チタン鉄鋼ジルコナイト・モナザイト
(4 ~ 10%の ThO_2)

ケララ(インド)の海岸



モナズ砂 (53mSv/y)

関東の100倍

- 将来の核燃料になる

トリウム(ThO_2)がMonaziteの主成分

トリウムの照射チェーン



← (n,2n) reaction ($E > 6\text{MeV}$)

→ (n,) reaction XX

Fission

XX XX
YY YY

Thermal cross section (barns)

Half lives

decay

