03 開発中の原子炉および研究炉等
03-04 研究炉等
03-04-01 研究炉の概要
03-04-01-01 研究炉の概要

＜概要＞

研究炉（research reactor）は、理工学研究、材料照射、RI生産、医療用照射など利用目的に応じた中性子を発生させるように設計された原子炉である。研究炉では、高温高圧の蒸気を発生させて利用する発電炉とは異なり、熱エネルギーは捨てられる。中性子ビーム炉（beam reactor）には多くの水平実験孔設備および中性子導管が設置されており、中性子散乱装置などの実験利用設備が取り付けられている。材料試験炉（Materials Testing Reactor）は多く垂直照射孔を持っており、照射孔にはキャプセル照射設備、水力ラビット照射設備などの照射設備が設置されている。

＜更新年月＞

2005年10月

＜本文＞

１．研究炉の特徴

研究炉（research reactor）は、図１に示すように、炉心の核反応によって中性子を多く発生させ、理工学研究、医療研究など利用目的に応じたビーム実験ができる実験孔設備を有する原子炉（狭義の意味の研究炉）、あるいは原子炉材料などの材料照射試験設備およびラジオアイソトープ生産ができる照射設備を有する原子炉（試験炉）である。研究炉は発電炉と異なり、炉心で発生した熱は冷却系統を通して捨てられる。炉心は利用中性子を多くするため小型高出力密度であり、発電炉よりウラン濃縮度の高い燃料（ウラン235濃縮度20%）を使用しているが、熱出力は発電炉に比べて低い（多くは100MW以下）。かつてはウラン235濃縮度90%ぐらいまでの燃料が使用できたが、米国からの強い要請により一部の研究炉を除いて低濃縮化（ウラン235濃縮度20%以下）燃料に替えられつつある。

多くの研究炉の核燃料はウラン・シリサイド−アルミニウム（U3Si2−Al）あるいはウラン・アルミナイド−アルミニウム（UAlx−Al）の合金板状燃料である。この合金板状型燃料はMTR型燃料と呼ばれている。原子炉冷却材は低温・低圧であり、原子炉内構成材は中性子吸収の小さいアルミニウム合金が多く使われる。多くのビーム実験設備および材料照射設備は共同利用施設として供用されている。研究炉の運転はサイクル運転（１１サイクル：１週間～４週間）が普通である。なお、ここでは開発中の原子炉などの炉物理特性を研究するゼロ出力の臨界実験装置、開発中の原子炉の原子炉運転特性把握および材料試験をするための実験炉、高速実験炉「常陽」、高温工学試験研究炉HTTR、の類についてはここでは触れないこととする。

発電炉は、炉心で得られた熱エネルギーを利用して高温高圧の蒸気を発生させ、この蒸気でタービンを回転させ発電する原子炉である。経済性にも配慮するので大型で熱出力も高い（最近の軽水冷却型発電所では3000MW以上）。核燃料には二酸化ウラン低濃縮（ウラン235濃縮度２～５%）が用いられている。炉内構成材は中性子吸収が小さく高温水中の耐食性が高いジルコニウム合金（燃料集合体で）やオーステナイト系ステンレス鋼（炉心槽、配管など）が多く用いられている。

２．研究炉の分類

2.1　利用目的で分類

（１）ビーム炉（Beam Reactor）

炉心で発生した中性子を原子炉反射体（ビーム炉では重水が多い）を貫通する水平実験孔（beam hole）に導き原子炉外に取り出して利用する設備を持つ研究炉のことである。このような

水平実験孔を多く持っている研究炉を中性子ビーム利用者間ではビーム炉と呼んでいる。ビーム炉を研究炉（狭義の意味で）と呼ぶこともある。日本で代表的なビーム炉はJRR（Japan Research Reactor）−3M（Modified）（20MW）である（表１、図２参照）。京都大炉（KUR）（5MW）もビーム炉である（表２、図３参照）。ビーム炉でも材料照射用の垂直照射孔を設置していることは普通である。

（２）材料試験炉（Materials Testing Reactor，MTRと略称）

炉心および原子炉反射体中に設けられている垂直照射孔を利用して、原子炉材料、核融合炉用材料などをいろいろな条件下で照射できるキャプセル照射設備、水力ラビット照射設備、核燃料を照射するBOCA（沸騰水キャプセル）照射設備などを有している研究炉である。ラジオアイソトープも生産する。材料試験炉は短時間で照射できるよう高中性子束を得るため高出力（50MW〜100MW）であるので、スィミングプール・タンク型（後述）を採用している。また各種照射後試験が行えるホットラボ施設を併設している。日本で代表的な材料試験炉はJMTR（Japan Materials Testing Reactor）（50MW）である（表３、図４参照）。

（３）ラジオアイソトープ生産炉

とくにラジオアイソトープ（放射性同位元素：Radioisotope，RIと略称；英語ではRadionuclide）生産専用の研究炉はほとんど無く、殆どの研究炉（材料試験炉、ビーム炉、教育訓練炉）でラジオアイソトープを生産している。

（４）教育訓練炉

固体均質（水素化・ウランージルコニウム：U−ZrH）燃料を用いているTRIGA（Training，Research，Isotope production， General Atomics）炉は固有安全性が高く小型で運転しやすいので、最初から教育訓練・アイソトープ生産用として設計され、同型炉としては世界で最も多く設置されている。JRR−4は比較的低出力（3.5MW）のスィミングプール・オープン型研究炉なので、原子炉研修生の原子炉運転実習用にも利用されている。

2.2　設計上の分類

（１）スィミングプール型研究炉

中性子減速材、原子炉冷却材、原子炉反射体および放射線遮へい材としてのプール水（軽水）の底部に炉心が設置されている研究炉がスィミングプール（swimming pool）型である。炉心部が水中を通して直接見ることができ、また炉心周辺が広いので作業性がよい。スィミングプール・オープン型と呼ばれることもある。JRR−4（3.5MW）はこの型の典型的な炉である（表４、図５参照）。燃料はMTR型でU3Si2−Al（シリサイド）、UAlx−Al（アルミナイド）の合金板状燃料要素が典型的である。U−ZrH合金燃料（棒状）のTRIGA炉もこの炉型に属する。JRR−3M、JRR−4、NSRR（TRIGA−ACPR型；300kW、パルス運転時最高23000MW）はスィミングプール・オープン型研究炉に分類される。

（２）タンク型研究炉

材料試験炉（JMTR）のような高出力炉では、原子炉冷却材の沸騰を抑えるため炉心をタンク（炉容器）中に収納している（図６参照）。この型をスィミングプール・タンク型あるいは単にタンク型と呼んでいる。原子炉反射体としては、軽水、重水、ベリリウム、アルミニウム、グラファイト（黒鉛）などが利用されるが、JMTRではベリリウムとアルミニウムが用いられている。

３．研究炉における実験利用設備

（１）中性子ビーム実験設備

ビーム炉では、原子炉反射体から生体遮蔽にかけて貫通している水平実験孔が設けられ、原子炉外へ中性子ビームとして取り出される。JRR−3Mの水平実験孔は炉心に対し接線方向に配置されており、旧来の炉心直視方向配置より質の良い（高速中性子やγ線が少ない）中性子ビームが得られる。水平実験孔には、中性子回折装置、中性子分光器などの高性能のビーム実験利用設備が取付けられる。中性子ラジオグラフィ専用として口径が大きい水平実験孔もある。JRR−4と京都大炉（KUR）には脳腫瘍治療（BNCT）など医療照射ができる中性子ビーム実験設備がある。

原子炉室から実験利用棟まで中性子ビームを導く中性子導管（内表面をニッケルコーティングしたガラス管内を全反射原理により遠方まで運ぶ）によって、実験に有害な高速中性子やγ線が少ない良質の中性子ビームが得られるので、精度の高い中性子散乱実験ができる。熱中性子導管（thermal neutron guides）２本と冷中性子導管（cold neutron guides）３本がJRR−3Mに設置されている（図７参照）。冷中性子源装置（Cold Neutron Source）では、原子炉外のヘリウム冷凍装置によって冷却された液体水素（原子炉反射体の中）を通すことにより熱中性子ビームから冷中性子ビームが作られ、冷中性子導管に送られる。冷中性子（エネルギーで５meV以下、波長で４オングストローム以上の中性子）ビームは中性子散乱実験に利用されるが、生体高分子の構造研究にとくに有用である。冷中性子源装置は京都大炉にも設置されている。

（２）照射利用設備

材料試験専用炉であるJMTRには、中性子束の高い炉心および原子炉反射体に上下貫通する垂直照射孔が設けられている。その照射孔には原子炉材料、核融合炉材料などの材料照射試験およびラジオアイソトープ生産のために、さまざまな環境条件の下に照射ができるキャプセル照射設備および水力ラビット照射設備、発電炉の原子炉冷却材条件（圧力、温度）の下で線出力急変させ核燃料の照射試験ができるBOCA（沸騰水キャプセル）照射設備が設けられている。ホットラボ施設はJMTRとはカナルで接続されており、この施設で、照射済み試料に対して金相試験や破壊強度試験等の照射後試験ができる。JRR−3Mにも放射化分析用照射設備、気送照射設備、水力照射設備、垂直照射設備および均一照射設備があり、均一照射設備ではシリコン半導体の製造が行われている。NSRRでは、反応度事故を模擬したパルス運転ができ、反応度事故時の原子炉燃料のふるまいを究明できるよう炉心中央に上下に貫通する直径約20cmの垂直実験孔をもっている。

＜関連タイトル＞

研究炉燃料低濃縮化計画（REPTR） (03-04-01-04)
研究炉のあり方検討報告 (03-04-01-05)
JRR-3（JRR-3M） (03-04-02-02)
JRR-4 (03-04-02-03)
原子炉安全性研究炉（NSRR） (03-04-02-05)
試験研究炉用ウラン燃料 (04-06-01-04)

＜参考文献＞

（1）日本原子力研究所：研究施設の利用、2002年
（2）日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部：”JMTR照射ハンドブック”JAERI−M 94−023（1994）
（3）日本原子力研究所東海研究所研究炉部：研究炉利用ハンドブック（1993年3月）p.45
（4）日本原子力研究所東海研究所研究炉部：研究炉−現状と役割−、研究炉部パンフレット（1997年7月）p.6，p.14
（5）日本原子力研究所：平成10年度成果報告会（スライド集）p.18
（6）日本原子力研究所：研究施設の利用
（7）日本原子力研究所大洗研究所：JMTRパンフレット（2003）p.9
（8）日本原子力研究所：研究炉利用ホームページ

表1　JRR－3M諸元

目的	ビーム実験、燃料材料照射、ラジオアイソトープ生産	
型式	濃縮ウラン軽水減速冷却プール型	
臨界年月日	平成2年3月22日	
最大熱出力	20,000kW(20MW)	
最大熱中性子束	2×10^{14}(n/cm^2・s)	
炉心の形状・大きさ	円柱、直径60cm、高さ75cm	
燃料	20wt%濃縮、UAlx-Al分散型合金板状燃料(ETRタイプ)	
冷却材	軽水	
制御棒	ハフニウム吸収体(箱型)、燃料フォロワ付制御棒	
運転形態	サイクル運転、27日連続／サイクル	
実験利用設備	水力照射設備(HR)	2基
	気送照射設備(PN)	2基
	放射化分析用照射設備(PN3)	1基
	均一照射設備(SI)	1基
	回転照射設備(DR)	1基
	垂直照射設備(RG,BR,VT-1,SH)	10孔
	水平実験孔(1G～6G,7R,8T,9C)	9孔
	冷中性子源装置	1基

［資料提供］日本原子力研究所　研究炉部

表2　KUR設計諸元

目　　的	一般研究、材料照射、放射性同位元素生産、開発研究、 医療照射、教育訓練
型　　式	濃縮ウラン軽水減速冷却スイミングプール系タンク型
臨界年月日	昭和39年6月25日
最大熱出力	5，000kW（5MW）
最大中性子束	8×10^{13}（n/cm^2・s）
炉心の形状・大きさ	直方体、約51cm×約51cm、高さ約61cm
燃　　料	93wt%濃縮ウラン板状燃料（MTR型） 低濃縮ウラン・シリサイド板状燃料2体（MTR型）
冷　却　材	軽水
制　御　棒	ホウ素入りステンレス鋼
運転形態	毎週運転、75時間／週
実験・照射設備	重水熱中性子設備 黒鉛設備 実験孔4本 照射孔4本 圧気輸送管3本 水圧輸送管1本 傾斜照射孔1本 貫通孔1本 長期照射設備

〔資料提供〕京都大学原子炉実験所

表3　JMTRの主要特性

項　目	主要な特性等	
炉型式		軽水減速冷却タンク型
原子炉出力	定格熱出力	50MW
中性子束	最大熱中性子束	～4×10^{18} $n/m^2\cdot sec$
	最大高速中性子束	～4×10^{18} $n/m^2\cdot sec$
冷却材、減速材		軽水
反射体		ベリリウム、アルミニウム
制御棒	吸収体	ハフニウム
	形式	燃料フォロワ付ボックス型
	員数	5式
燃　料	濃縮度	20%
	芯材	シリサイド燃料
	ウラン密度	$4.8g/cm^8$
	炉心装荷本数	24体
	フォロワ燃料	5体
照射設備	キャプセル照射設備	計装付25体、その他35体
	水力ラビット照射設備	1基
	出力急昇試験設備（BOCA／OSF）	1式

下記の出典をもとに作成した

[出典] 日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部：”JMTR照射ハンドブック”JAERI-M 94-023(1994)

表4　JRR－4の諸元(改造後)

項　目	内　容
炉型式	濃縮ウラン軽水減速冷却スイミングプール型
	非均質型研究用熱中性子炉
臨界年月日	平成10年(1998年)7月14日
最大熱出力	3,500kW(強制循環冷却時)
	200kW(自然循環冷却時)
中性子束	最大熱中性子束:5.3×10^{18}(n/cm^2・sec)
	最大速中性子束:1.7×10^{18}(n/cm^2・sec)
原子炉炉心	構成要素:燃料要素、反射体要素格子栓、格子板、制御棒
	炉心寸法:34.4cm×40.5cm、高さ60cm
燃料要素	要素体数:20体
	材質:ウランシリコンアルミニウム分散型合金(U3Si2-Al)
	ウラン濃縮度:約20%(19.75%)
	燃料被覆材:アルミニウム合金
	燃料要素構造:ETR平板型(燃料板15枚)
	要素寸法:80mm×80mm×1,025mm
冷却材	軽水
制御棒	天然ボロン1.6W%入りステンレス鋼
運転形態	ディリー運転、7h/日
実験利用設備	中性子ビーム実験設備(医療照射設備)
	放射化分析用設備
	水力照射設備
	大口径照射設備(15cm)
	プール設備(即発ガンマ線分析装置、No.1プール内)

下記の出典をもとに作成した

[出典]日本原子力研究所東海研究所研究炉部:研究炉利用ハンドブック(1999年3月) p.45 および 日本原子力研究所東海研究所研究炉部:研究炉ー現状と役割ー、研究炉部パンフレット(1999年7月) p.6

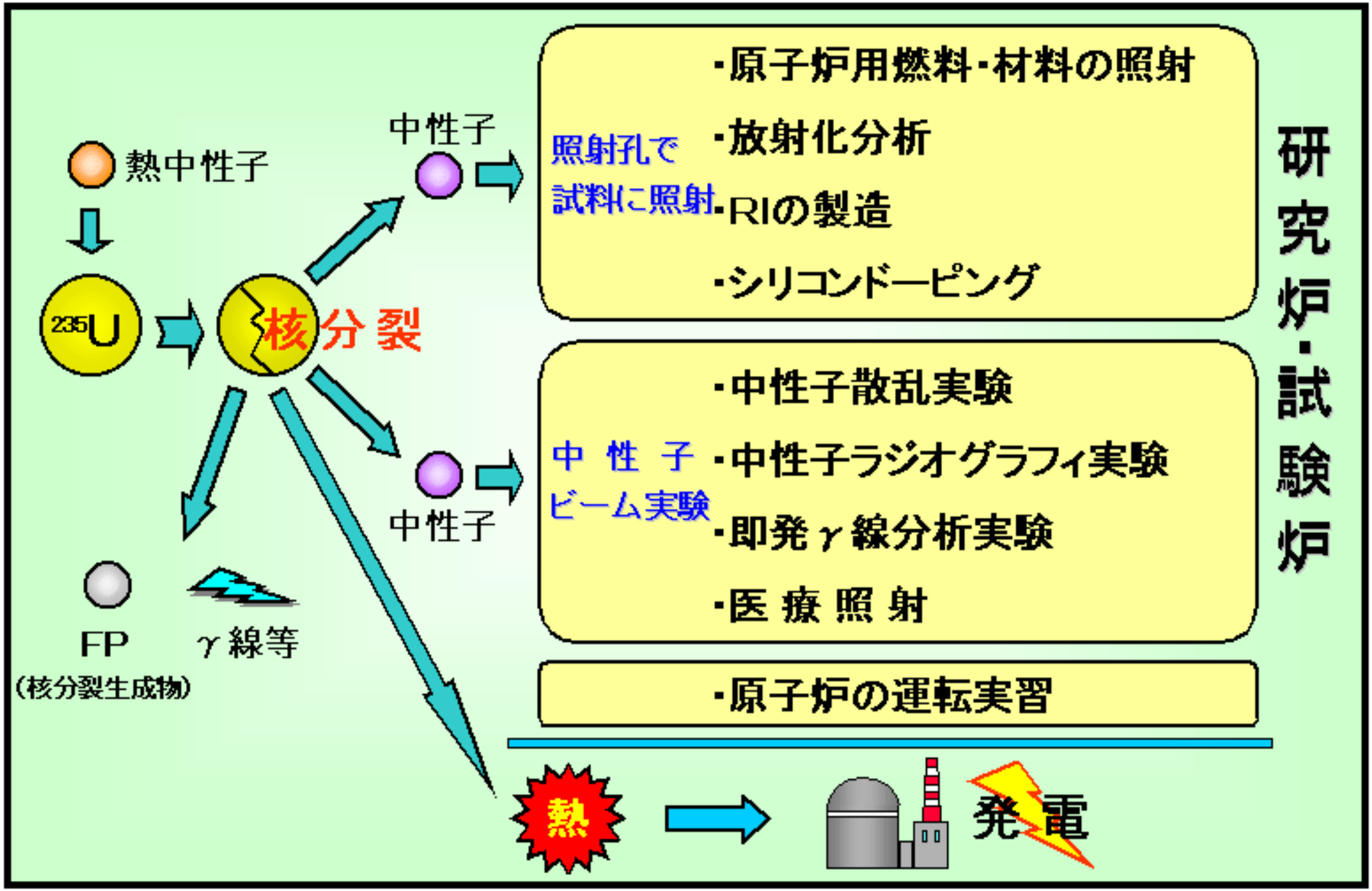


図1　研究炉・試験炉の役割

[出典] 日本原子力研究所：平成10年度 成果報告会（スライド集）P.18

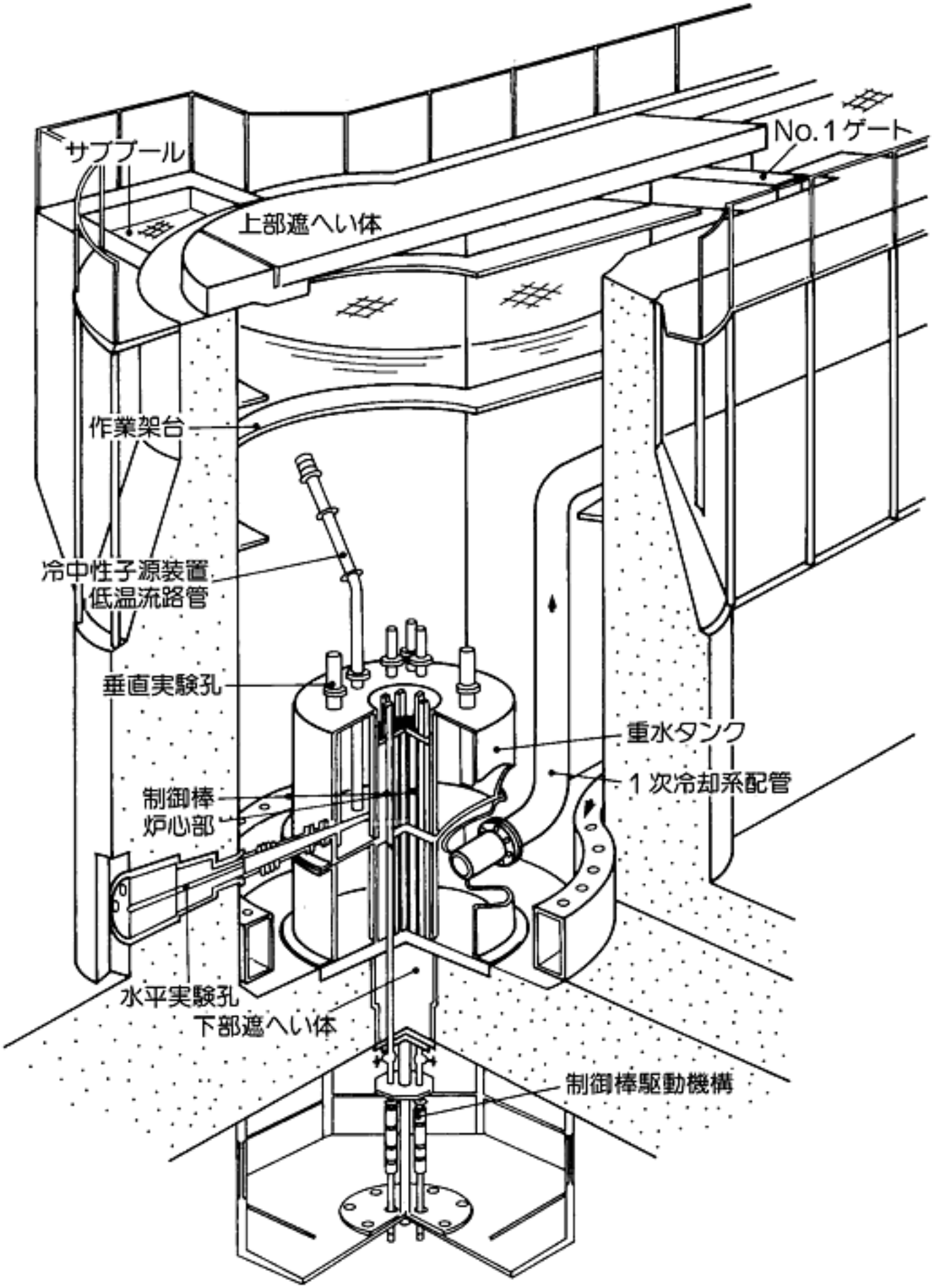
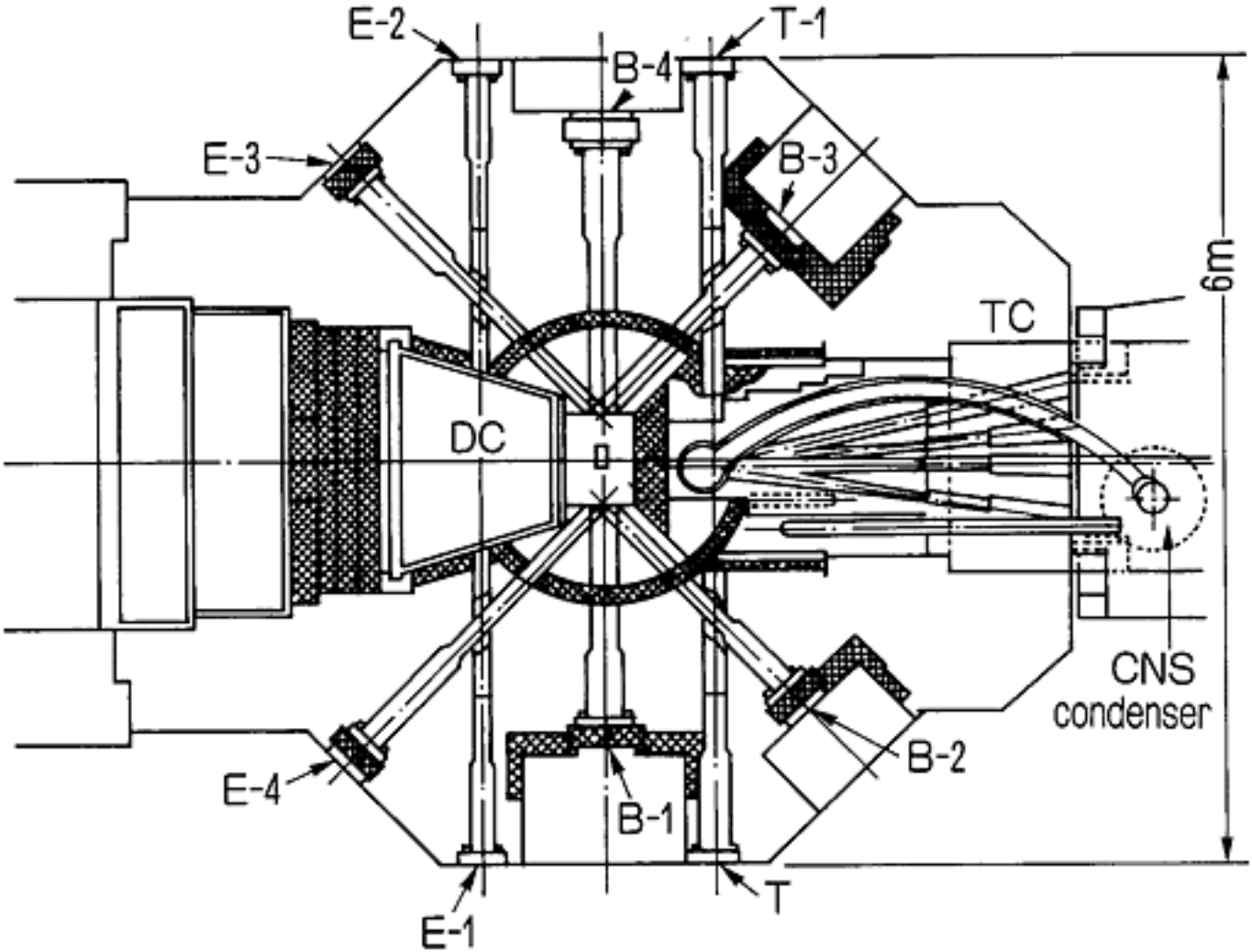


図2　JRR－3M原子炉プール鳥かん図

［資料提供］日本原子力研究所　研究炉部



重水熱中性子設備：DC(標準熱中性子場、生物・医療照射等)
黒鉛設備：TC(CNS：冷中性子源設備)
実験孔：B-1，B-2(中性子回析)，B-3(中性子回析)，B-4(中性子導管)
照射孔：E-1，E-2(中性子ラジオグラフィ)，E-3(中性子導管)，E-4(低温照射)
貫通孔：T-1(オンライン同位体分離装置)

図3　KURの水平断面図

[資料提供]京都大学原子炉実験所

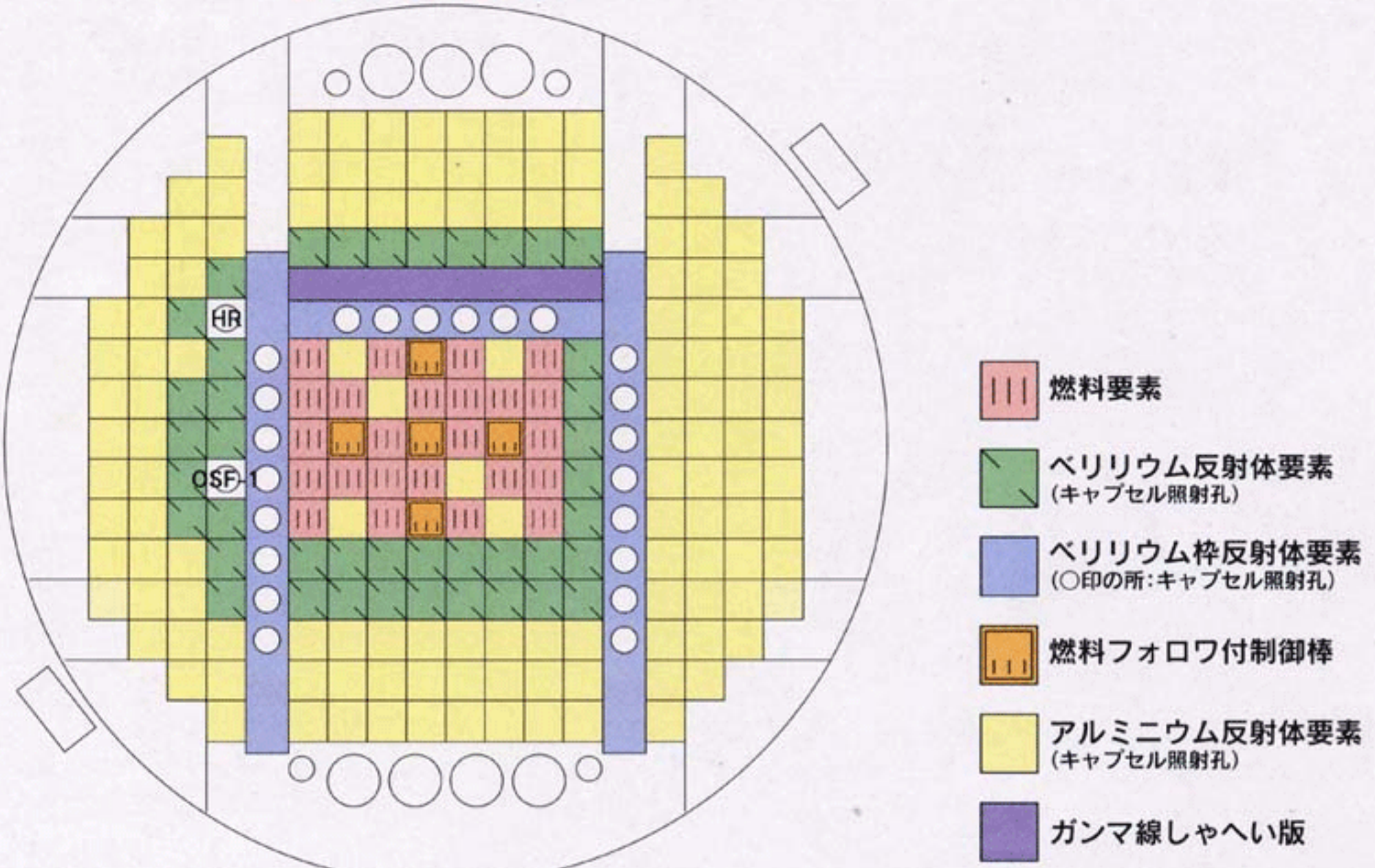


図4　JMTRの炉心配置図

[出所]日本原子力研究所:研究施設の利用、p16、http://kikaku.tokai.jaeri.go.jp/ken-kyou/sisetu-syoukai/JMTR.html

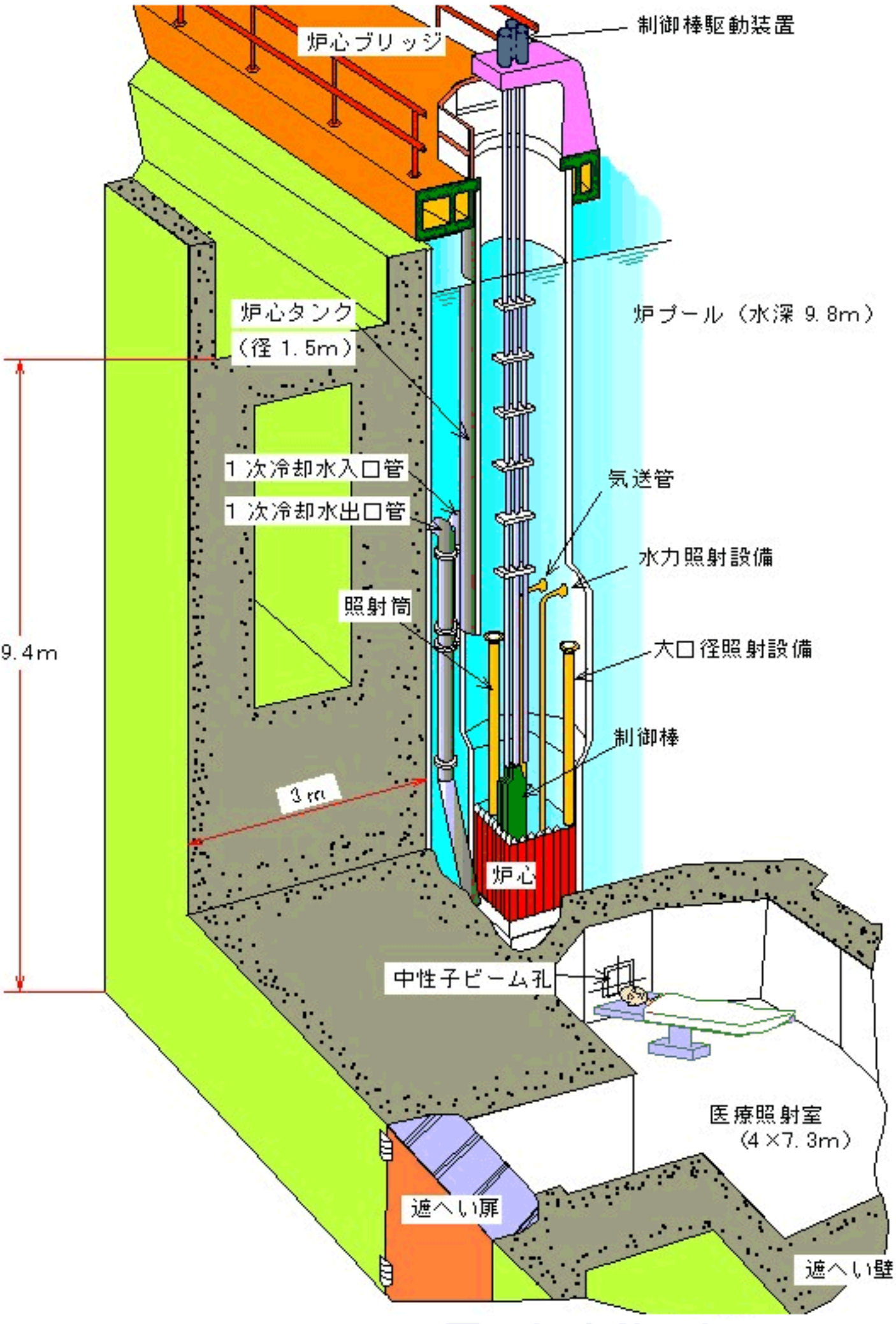


図5　JRR－4原子炉本体の概要

[出典]日本原子力研究所東海研究所研究炉部：研究炉－現状と役割－、研究炉部パンフレット(1999年7月) p.14

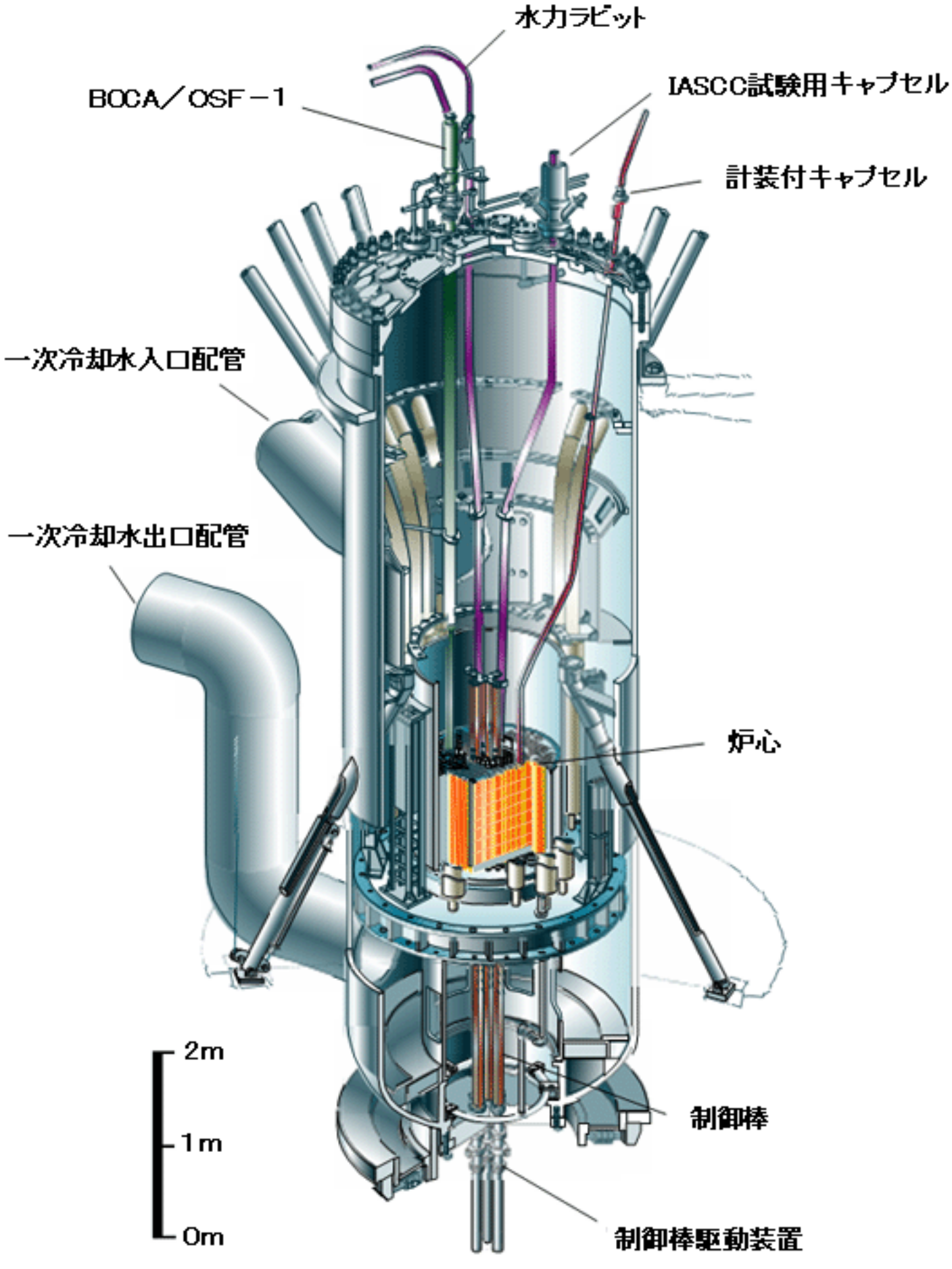
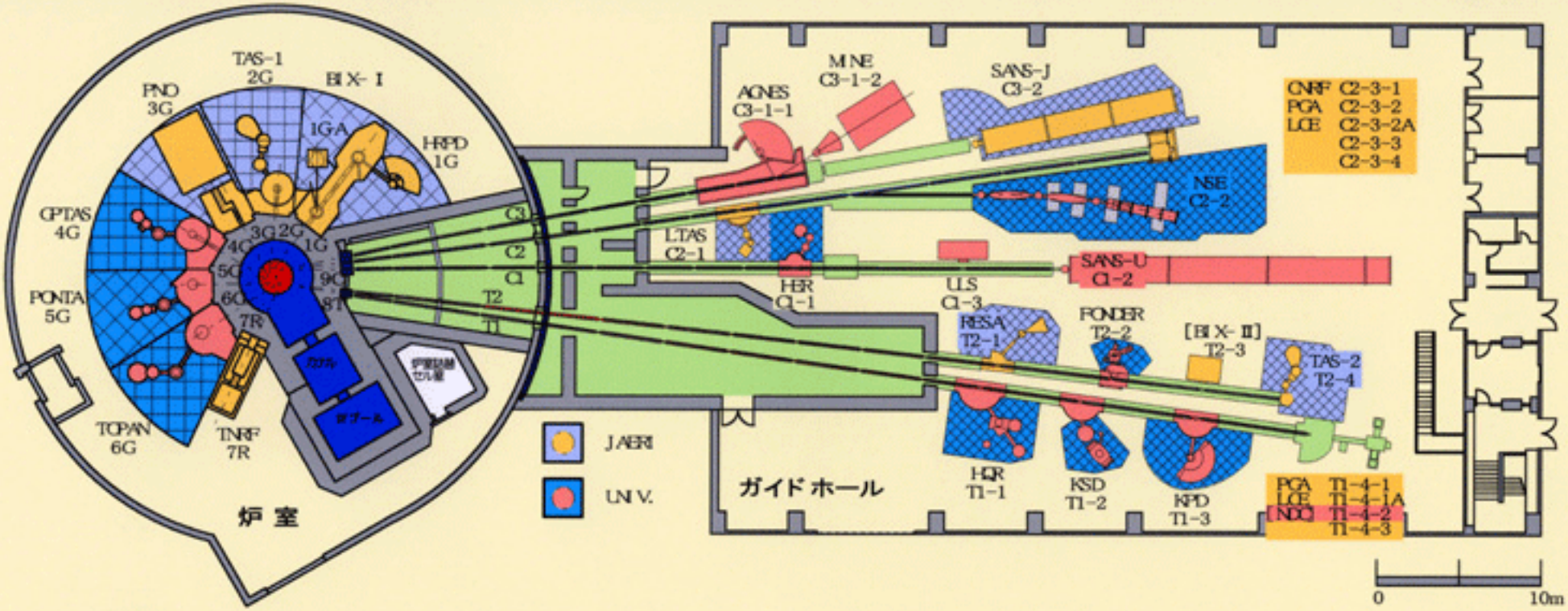


図６　ＪＭＴＲの炉容器構造

[出典]日本原子力研究所大洗研究所：JMTRパンフレット (2003) p.9



熱中性子ビーム（ 炉室）

ビームポート		実験装置	組織名
1G	HRPD	高分解能粉末中性子回折装置	JAERI
1G-A	BIX-I	生体高分子結晶構造解析用中性子回折計	JAERI
2G	TAS-1	三軸型中性子分光器	JAERI
3G	PNO	中性子トポグラフィ及び精密光学実験装置	JAERI
4G	GPTAS	汎用三軸型中性子分光器	ISSP
5G	PONTA	偏極中性子散乱装置	ISSP
6G	TOPAN	東北大学中性子散乱分光器	TOHOKU
7R	TNRF	中性子ラジオグラフィ装置	JAERI

JAERI : 日本原子力研究所
ISSP : 東京大学物性研究所
TOHOKU : 東北大学
KUR : 京都大学

熱中性子ビーム（ ガイドホール）

ビームポート		実験装置	組織名
T1-1	HQR	中性子偏極回折装置	ISSP
T1-2	KSD	単結晶中性子回折装置	TOHOKU
T1-3	KPD	粉末中性子回折装置	TOHOKU
T1-4-1	PGA	即発ガンマ線分析装置	JAERI
T1-4-A	LCE	低温化学実験装置	JAERI
T1-4-2	(NDC)	(中性子カメラ回折装置)	(ISSP)
T1-4-3		TOF型中性子反射率計	JAERI
T2-1	RESA	残留応力解析装置	JAERI
T2-2	FONDER	中性子単結晶4軸解析装置	ISSP
T2-3	BIX-II	中性子P付生体物質中性子回折計	JAERI
T2-4	TAS-2	高分解能三軸中性子分光器	JAERI

冷中性子ビーム（ ガイドホール）

ビームポート		実験装置	組織名
C1-1	HER	高エネルギー分解能三軸中性子分光器	ISSP
C1-2	SANS-U	二次元位置測定小角散乱装置	ISSP
C1-3	ULS	超高分解能後方散乱装置	ISSP
C2-1	LTAS	冷中性子実験散乱デバイス開発装置	JAERI
C2-2	NSE	中性子スペクトル変調・時間分析装置	ISSP
C2-3-1	CNRF	冷中性子ラジオグラフィ装置	JAERI
C2-3-2	PGA	即発ガンマ線分析装置	JAERI
C2-3-2A	LCE	低温化学実験装置	JAERI
C2-3-3			
C2-3-4		TOF型中性子反射率計	JAERI
C3-1-1	AGNES	高分解能パルス冷中性子分光器	ISSP
C3-1-2	MINE	多層膜中性子干渉計/反射率計	KUR
C3-2	SANS-J	中性子小角散乱装置	JAERI

図7　JRR－3M中性子ビーム実験装置

[出所]日本原子力研究所：研究炉利用ホームページ、http://rrsys.tokai.jaeri.go.jp/riyou-setsubi/index03.html