

# RI製造の視点から見た 研究用原子炉の在り方

平成30年2月6日

(株)千代田テクノル  
竹内宣博

# 原子力の平和利用

原子力エネルギー  
利用(原子力発電)

放射線利用

## エネルギーセキュリティ

エネルギーの安定供給  
原子力発電技術の高度化  
原子力発電に係る安全・安心

## 生活セキュリティ

医療・工業・農業用RIの安定供給  
放射線診断/治療技術の高度化  
医療に係る安全・安心

両者とも基本的に海外に機能を委ねることができない事項

# RI 製造・頒布の民間移転からの経緯

## 日本原子力研究所における放射性同位元素の製造頒布事業の合理化

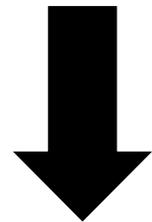
4. 移転に際し考慮すべき事項等

1997年2月の「特殊法人の整理合理化」に関する閣議決定

(2) 原研は、本事業の移転先に対し、円滑な事業移転を図るため、技術移転、RI製造に係わる原子炉の利用等の面で十分な協力を行うこととする。

RIの安定供給

原子力二法人等準備会議報告書(2003年9月19日)でJMTRの廃炉決定



参考7 研究施設の整理・合理化について(抜粋)

材料試験炉の廃止を進めるに当たっては、原研において検討委員会を設置し、代替機能の確保に留意するとともにユーザーコミュニティの意見等を聴取しつつ、適切な廃止の方法と時期を検討。

総合科学技術会議でJMTR 再稼動決定 (2006 年10月24日)



2007年度から4年間で改修

東日本大震災派生(2011 年3月11日)



再稼動準備

施設中長期計画を公表し、JMTR を廃止する施設に分類 (2017 年4月1日)

# 日本に何基の研究用原子炉を建設するのか？

項目	試験炉型	研究炉型	
	(JMTR)	(JRR-3)	(KUR)
相対的な原子炉出力レベル	高出力	中出力	低出力
中性子利用場所	炉内	炉外・炉内	炉内・炉外
基礎・基盤研究開発			
国家的セキュリティへの寄与 <sup>*1</sup>		×	×
(RI製造に対する一般的相性)			×

(\*1) 原子炉の機能だけでなく、炉心への照射物の挿入・取出しが原子炉運転中に可能な特殊照射設備も必要になる。例えば、<sup>99</sup>Mo製造のためには、炉心の高熱中性子束領域で照射し、かつ1週間毎に原子炉運転中に照射物の挿入・取出しが必要になる。



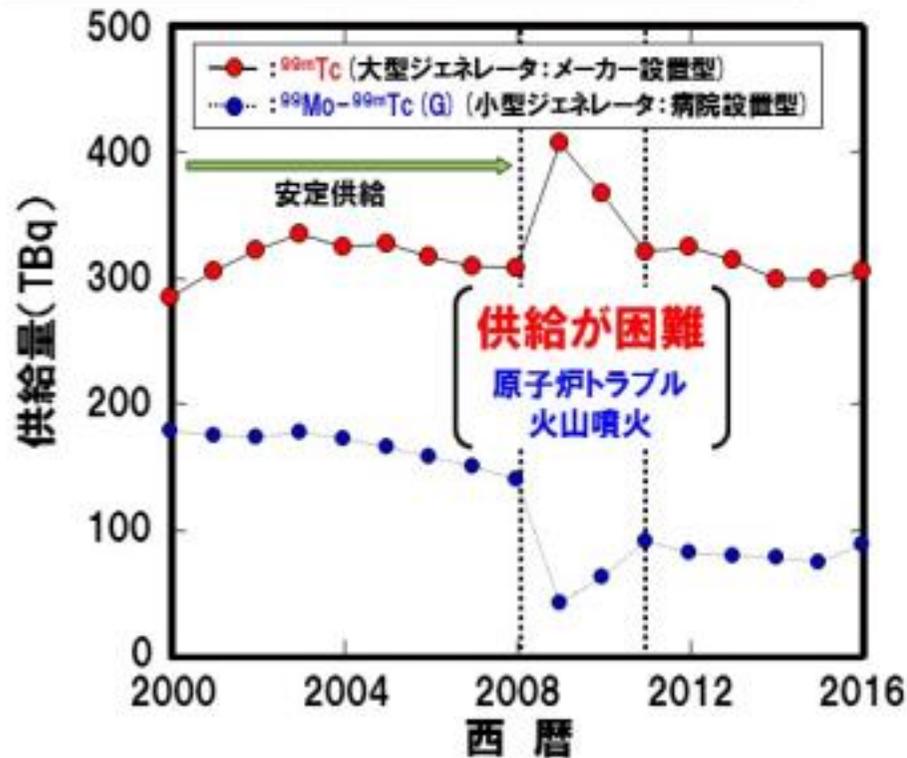
**1基新設とすれば、特殊照射設備とホットラボ施設を備えた試験炉型の原子炉施設が最適**

# RI 需要の現状と今後の予測 (1) <sup>99</sup>Mo 利用

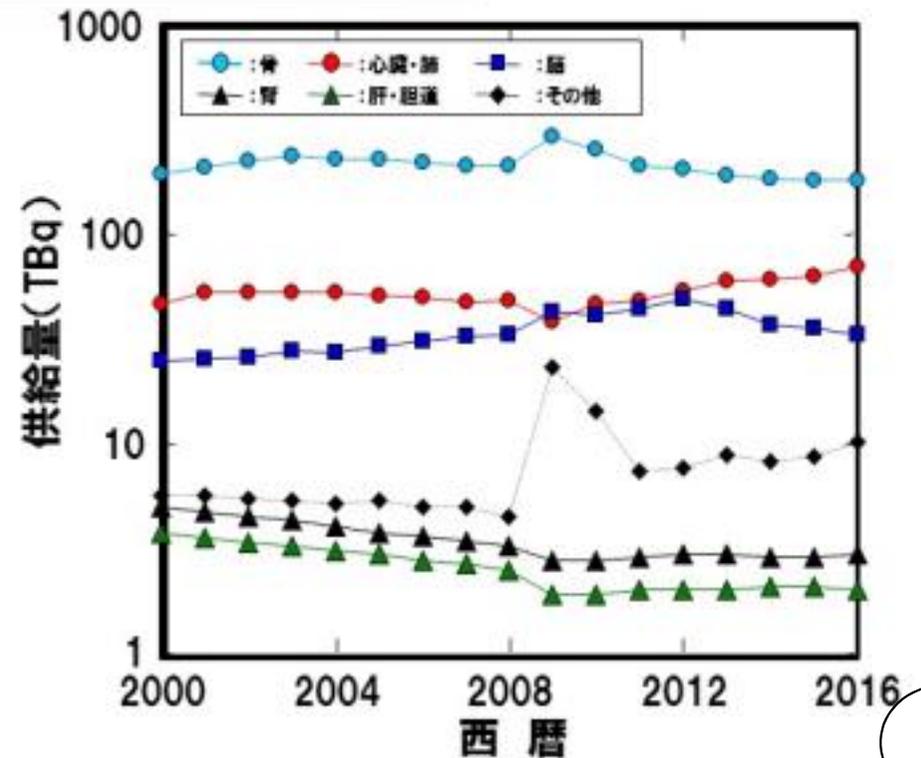
<sup>99m</sup>Tcと<sup>99</sup>Mo・<sup>99m</sup>Tc(G:ジェネレータ)の供給量は年々減少傾向であるが、他の核種と比較して圧倒的に多く、2015年度は前者は61%、後者は15%の供給量を占め、合計で75%以上に達している。

<sup>99m</sup>Tc注射剤供給量の**時間的推移はほぼ横ばい**であり、核医学検査薬として**主要な核種**である。

インビボ用<sup>99</sup>Mo-<sup>99m</sup>Tc医薬品の供給量



<sup>99m</sup>Tc注射剤の供給量



【参考文献】「放射性医薬品流通統計2005, 2012, 2017」等、(社)日本アイソトープ協会編

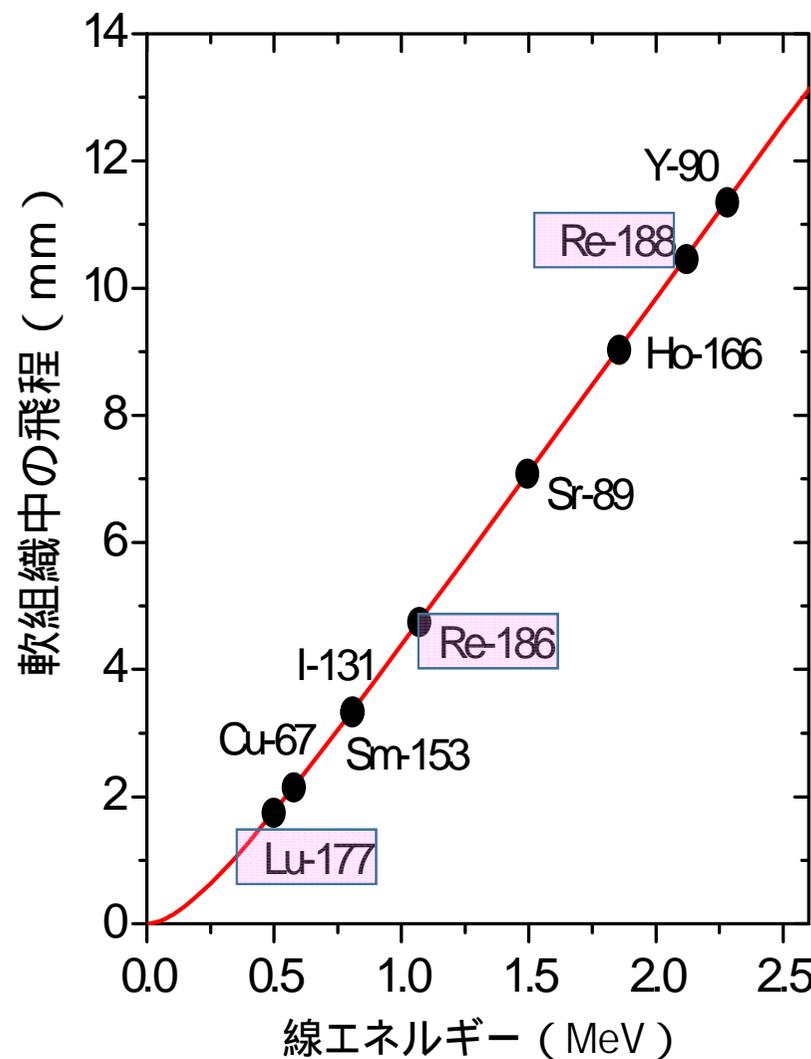
# RI 需要の現状と今後の予測 (2)

## 核種利用

核種	半減期 (日)	β線の最大エネルギー	主なγ線エネルギー
Sr-89	50.5	1.49 MeV	-
Y-90	2.7	2.28 MeV	-
I-131	8.0	0.61 MeV	364 keV
Cu-67	2.6	0.58 MeV	185 keV
Sm-153	1.9	0.81 MeV	103 keV
Ho-166	1.1	1.85 MeV	81 keV
Lu-177	6.7	0.50 MeV	208 keV
Re-186	3.8	1.07 MeV	137 keV
Re-188	0.7	2.12 MeV	155 keV

■ : 放射性医薬品として認可されている内用療法用RI

■ : 加速器で発生した中性子による製造核種



# RI 需要の現状と今後の予測 (3)

## 核種利用

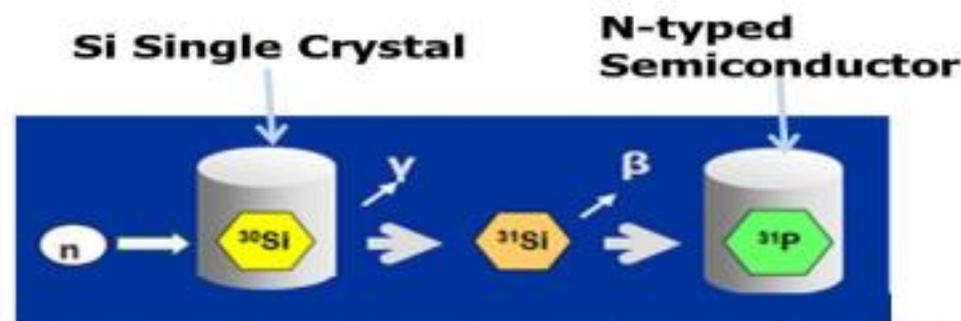
- ◆ 線よりも飛程が短い 線が利用できるようになれば、強力に細胞内のDNAを破壊し、正常組織に対する放射線影響も最小限に抑えられるため、現在よりも腫瘍だけを集中的に攻撃する効果的な治療が期待される。
- ◆ 2016年から、**線核種 ( $^{223}\text{Ra}$ )を用いた治療**が国内でも開始され、うなぎのぼりの増大傾向にある。

核種		半減期	製造方法
$^{223}\text{Ra}$	ラジウム	11.4d	原子炉
$^{211}\text{At}$	アスタチン	7.21h	原子炉 サイクロトロン
$^{212}\text{Bi}$	ビスマス	60.6d	原子炉
$^{225}\text{Ac}$	アクチニウム	10.0d	原子炉
$^{213}\text{Bi}$	ビスマス	45.6m	原子炉
$^{149}\text{Tb}$	テルビウム	4.15h	原子炉 シンクロトロン

線の飛程: 2~10mm、 線の飛程: < 0.1mm

### Si半導体の製造 $^{30}\text{Si}$ を照射して $^{31}\text{P}$ を製造

- ◆ NTD-Si以外のガスドーピング法による代替品の開発により、これまでは減少傾向にあったが、ここ数年は上記レベルを維持している。
- ◆ 今後の傾向としては、パワー半導体利用の急成長が予想されるため、業界全体で需要予測検討を開始した。



Neutron-Transmutation Doped Si (NTD-Si)

# RI製造のための新施設への要望概要

施設		要望	必要条件
原子炉施設	照射設備	短時間照射設備整備	秒から時間のレベルで制御
		長時間照射のための照射孔の安定確保	製造均一化の観点から、同一照射孔の長期間専用
	原子炉	炉心有効長の長尺化	製造の効率化
		365日運転(原子炉1基では不可能なので、少なくとも高稼働率を達成)	製薬会社の輸送体制に合致(羽田空港からの全国配送)
ホットラボ施設	- セル以外に - セルの整備	今後需要が増える可能性がある 核種への対応	

原子炉施設とホットラボ施設が直結しており、24時間体制での作業を可能にして、利用者に対してフレンドリーなサービスを提供できるような施設を整備してほしい。

# 炉利用の立場から見た研究用原子炉の在り方例

主な知見	対応点	新提案例
京大原子炉(KUR)とJAEA原子炉(JMTR)とのシナジー効果が希薄	「東と西」、「大学と法人」、「基礎研究と応用研究」等に1基づつといった発想を転換	高出力炉と低出力炉を新設し、両者を連携させながら運営する。例えば、新たに高出力炉に設置すべき先進照射設備についてAll Japanで低出力炉を用いて検討し、その結果を用いて高出力炉に設置する。その過程で原子炉技術を俯瞰的に体得した若手研究者・技術者も育成する。
今、原子力の原点問題は東電福島原発(1F)にあり、そこで発生している課題とリンクさせながら活動することが必要	今後取り出される溶融燃料や構造材料の研究開発を通じて各種事象の解明を行い、原発事故の知見を将来に生かすこと等を念頭に置いた取り組み	新規設備整備に際しては、高出力炉と低出力と大熊分析・研究センター(廃炉国際共同研究センター)の <b>三位一体</b> で検討し、設備だけでなく、人材の流動パスも考えた <b>共通のロードマップ</b> を作成する。

## (キーワード)設備の連携と人材の流動化

- ◆All Japan で知恵を出し合って世界最高の研究環境を創造し続ける。
- ◆低出力炉で学んだ若手研究者・技術者が高出力炉、1F等に係る環境で働く道筋を作る

# まとめ

研究用原子炉を1基しか新設しないのであれば、特殊照射設備とホットラボ施設を備えた**試験炉型の原子炉施設がRI製造に関して最適**である。

2006年7月にJMTRが運転停止して以来、**11年間**、JMTRの運転再開を目標に**7名の研究員体制**で<sup>99</sup>Mo製造技術開発を行い、実際の製造場であるJMTRとホットラボ施設を用いた実証試験を残すばかりになっている。一方、製造開始時期が明確でない状況において、今後この体制を維持し、技術承継していくことは非常に困難である。従って、**適切な廃止の方法と時期**に関しては、速やかな<sup>99</sup>Moの**国産化に向け**、KUR、HTTRやJRR-3の新規制基準の対応経験を活用し、潜在リスク低減(国民の安全・安心)の視点から**適切な措置(使用済燃料の乾式貯蔵等)**を施した上で、**新設されるまでの期間限定でJMTRを運転し、その後、廃止することを望む**。

高出力炉/低出力炉の新設と東電福島原発の廃炉研究を**三位一体**で検討し、人材の流動パスも考えた「**共通の原子力研究開発基盤ロードマップ**」を作成する。

# 付録資料

付録1

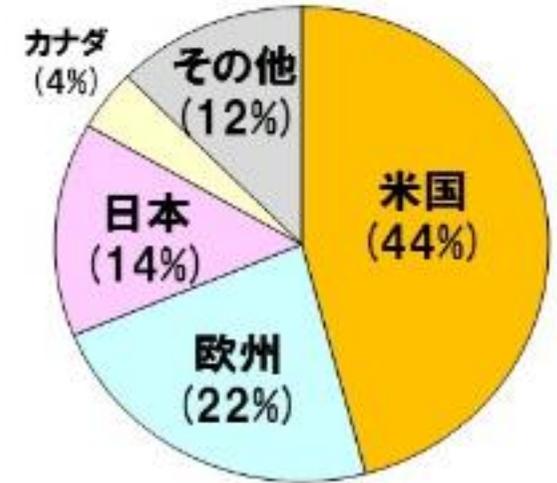
$^{99}\text{Mo}$ の娘核種である $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は核医学検査薬として利用。日本は、欧米につぐ世界第3位の消費国であるにもかかわらず、**国産化率はゼロ**である。

$^{99}\text{Mo}$ は100%外国から輸入

欧米の製造用原子炉の老朽化、火山噴火等による航空輸送への影響。

$^{99}\text{Mo}$ は $^{235}\text{U}$ を中性子照射により製造

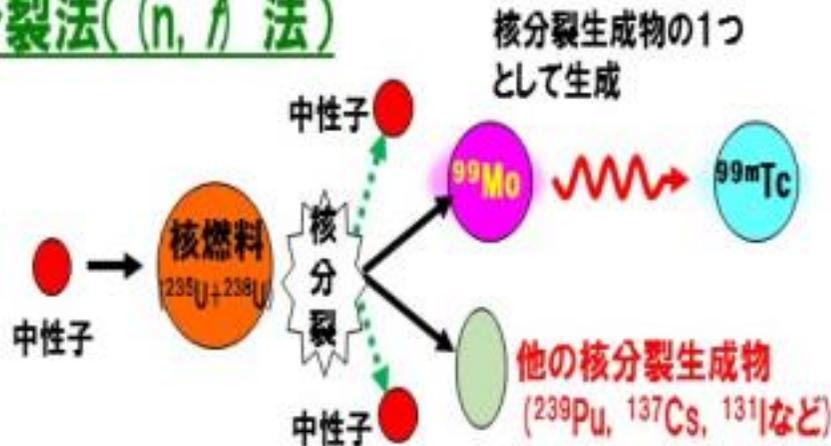
核分裂性廃棄物処理及び核不拡散上の問題。



$^{99}\text{Mo}$ の需要(国別の使用量)

$^{99}\text{Mo}$ 製造方法

核分裂法( $(n, f)$ 法)



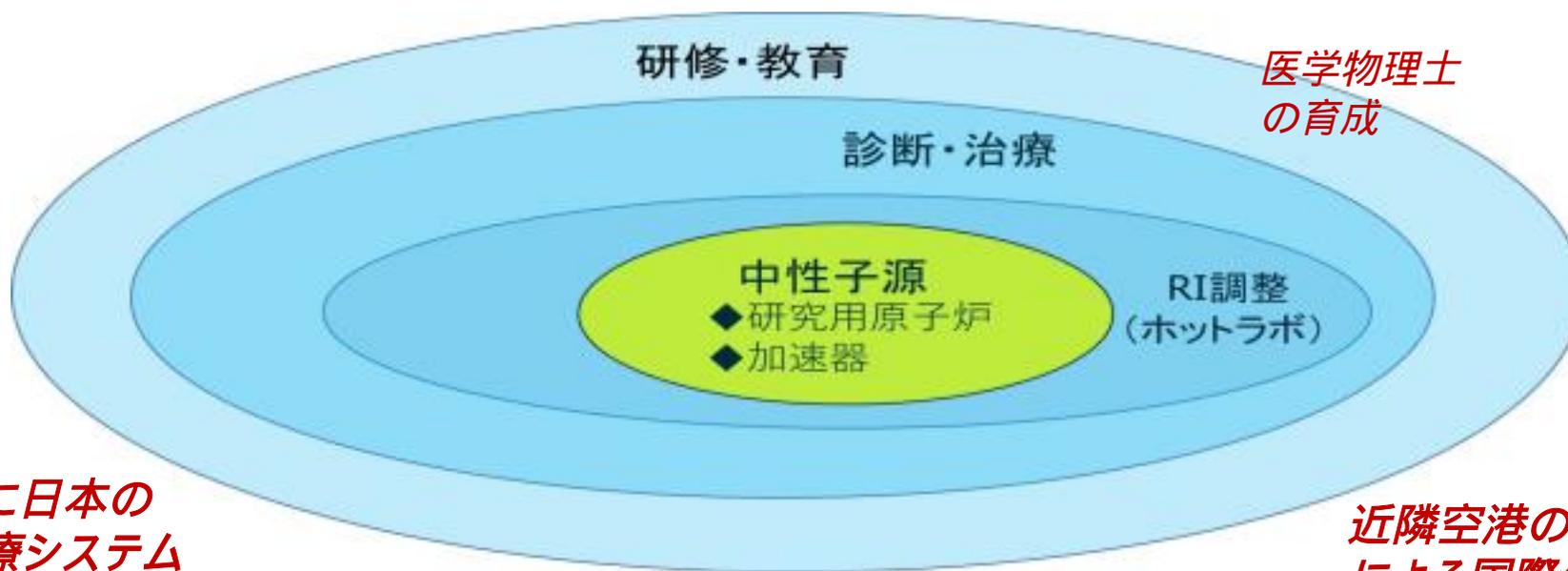
放射化法( $(n, \gamma)$ 法)



- プルトニウムは生成せず、核不拡散に貢献。
- 製造コストの低減可能。

# 中性子源を中核とする 21世紀医療イノベーションパークの創出

(例) 試験研究炉を有する自治体が連携し、All Japan で大学、産業界等が結集して、**21世紀の医療を創造**する。



定期的に日本の  
先進医療システム  
の発表展示会開催

近隣空港の活用  
による国際化

21世紀医療イノベーションパークの構成

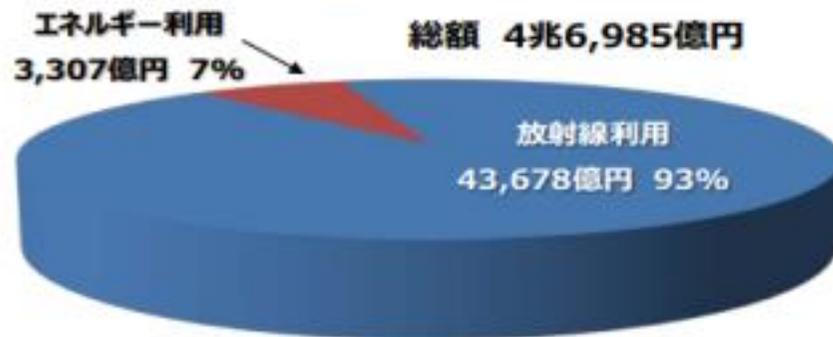
# 放射線利用の経済規模調査(1)

第29回原子力委員会資料  
(平成29年8月29日)より抜粋

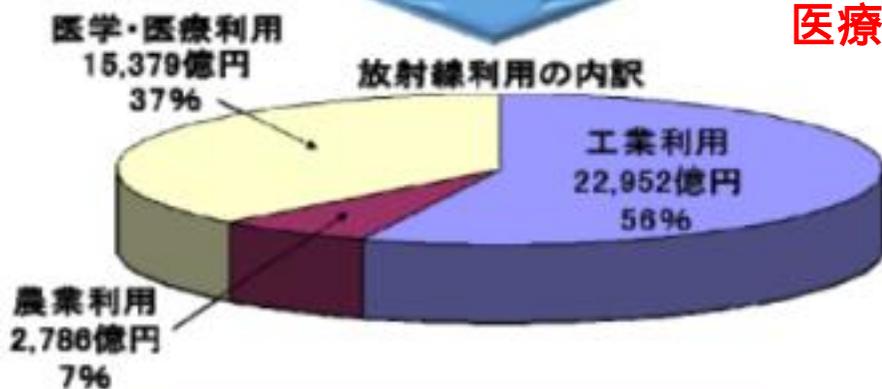
平成17年度の調査結果



平成27年度の調査結果



医療・医学利用が拡大



平成17年度  
放射線利用 経済規模  
4兆1,117億円

1.06倍  
(GDP: 1.03倍)

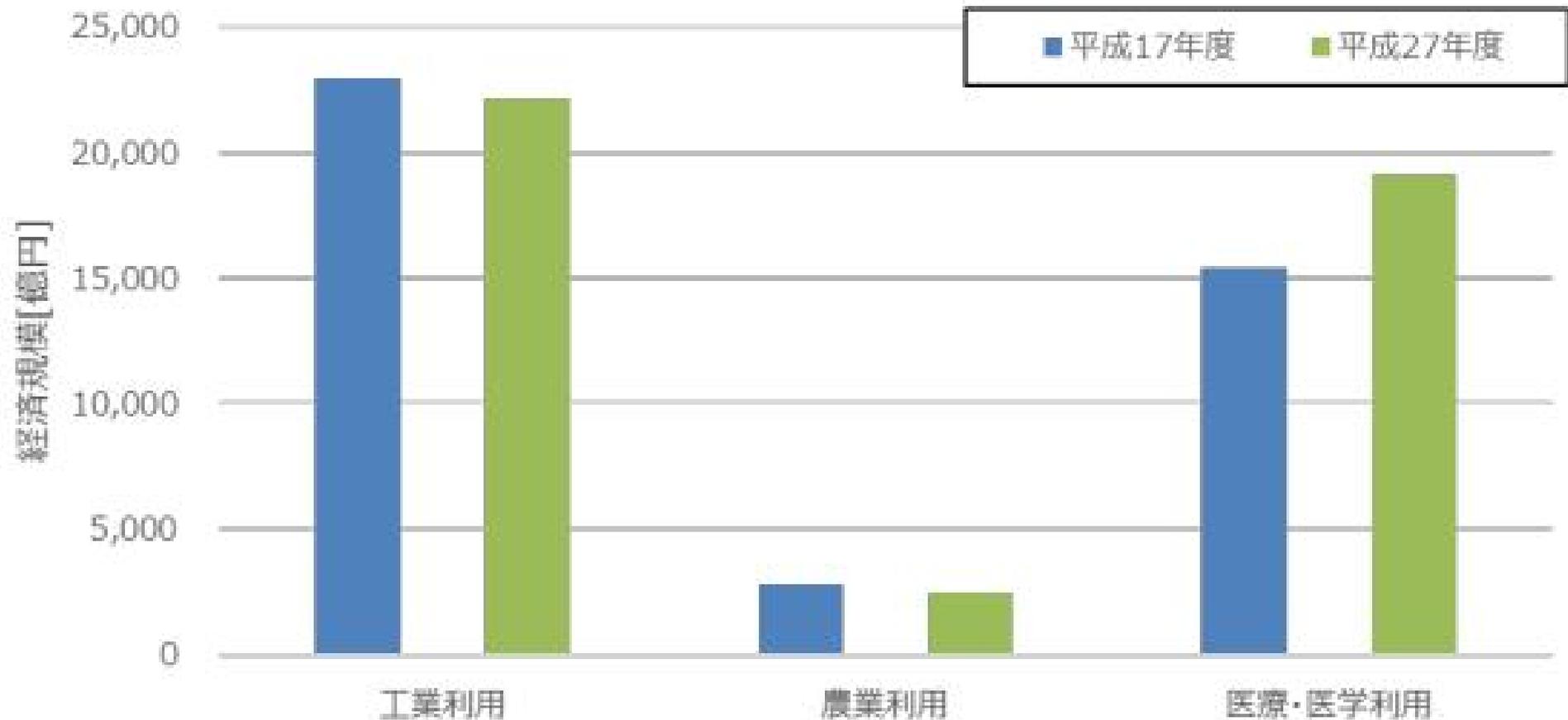
平成27年度  
放射線利用 経済規模  
4兆3,678億円

若干増大傾向で減少せず

# 放射線利用の経済規模調査(2) 平成27年度の放射線利用に係る詳細内訳



# 放射線利用の経済規模調査(3) 前回調査からの変化と本調査の特徴



## 研究用原子炉で期待されるRI線源

要望されている核種		半減期	用途	ターゲット	ターゲット組成・形状	生成反応
従来の RI製品	Ir-192 (工業用)	73.83d	非破壊検査	Ir-191	2.0φ×2.0mm Irペレット	(n,γ)
	Co-60 (小線源)	5.269y	計測機器	Co-59	0.46φ×10mmニードル、 0.91φ×15mmニードル	(n,γ)
	Yb-169	32.00d	非破壊検査	Yb-168	1.0φ×2.0 Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ペレット	(n,γ)
	Au-198(*)	2.6937d	舌癌治療	Au-197	0.8φ×2.5mm Auグレイン	(n,γ)
新たな RI製品	Co-60 (大線源)	5.269y	滅菌用線源	Co-59	スラグ6φ×25mm又は、 ディスク7φ×1.1mm 密封カプセル寸法： (11.1φ×451.5mm)	(n,γ)
	Ir-192 (ウエハー)	73.83d	非破壊検査	Ir-191	1φ×0.5mm ウエハー×2枚	(n,γ)
	I-125 (シード線源)	59.4d	前立腺がん 治療	Xe-124	<sup>124</sup> Xeガスループ又は 密封	(n,γ)β <sup>+</sup> →
	Sr-89	50.53d	疼痛軽減用 医薬品	Sr-88	酸化ストロンチウム (SrO)	(n,γ)
	Se-75	119.8d	非破壊検査	Se-74	3φ×3mmシリンダー (Se,Ti,V金属化合物)	(n,γ)
国産化 開発中 RI製品	Mo-99/ Tc-99m	65.95h/6.0h	がん診断用 医薬品	Mo-98	MoO <sub>3</sub> ペレット	(n,γ)β <sup>-</sup> →
	W-188/Re- 188,Re-186, Lu-177など	69.4d/17h, 2.72d, 6.73d	がん治療用 医薬品	W-186 Re-185 Yb-176	WO <sub>3</sub> 粉末 Re金属粉末 Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 粉末	(n,γ)(n,γ)β <sup>-</sup> → (n,γ)β <sup>-</sup>

## 発電炉と研究用原子炉の機能比較

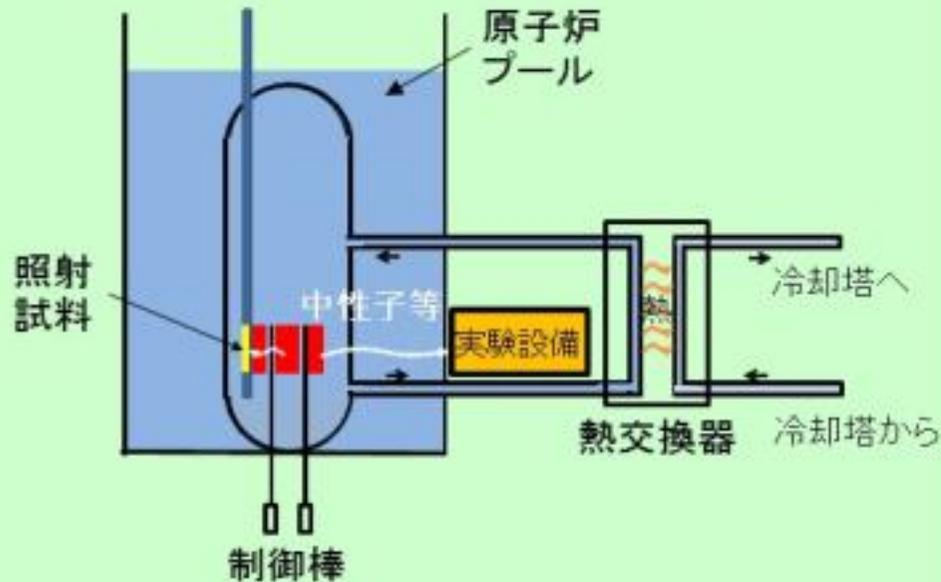
**研究用原子炉**は、発電用原子炉（以降、発電炉と称す）の発電利用とは異なり、**核分裂連鎖反応で発生した中性子を基礎から応用までの広い分野にわたって実験・研究等に利用することを目的とした原子炉**である。しかしながら、研究用原子炉と発電炉が持つべき機能は異なるとは言え、原子炉施設としては共通する面もあり、原発事故から得られた知見を踏まえた安全対策等に関する検討も不可欠である。

「**発電以外の原子力利用の課題と展望(研究用原子炉を用いた工業生産)**」  
(平成26年度日本学術会議近畿地区会議学術講演会)平成26年8月30日より抜粋

# 【目的と構造】

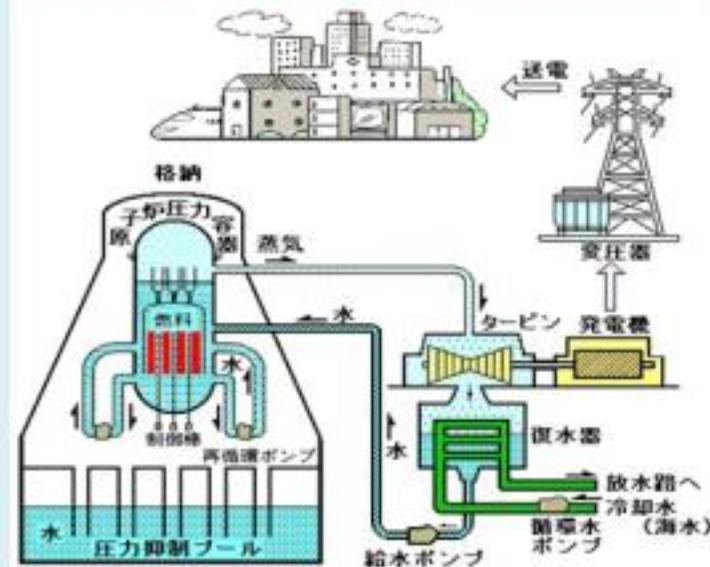
## JMTR

ウランを核分裂させて得られる中性子やガンマ線を利用して、材料の照射や医療に役立つ物質の製造のための原子炉です。



## 発電炉

ウランを核分裂させて熱エネルギーを得て水を沸かし、蒸気力で蒸気タービンを回転させて電気を起こす原子炉です。



沸騰水型原子炉(BWR)原子力発電のしくみ

[出典] 電気事業連合会(編)原子力図面集-1997年版-, p98

# 【ウラン量や核分裂生成物量】

炉心内のウラン量



発電炉のウラン235重量を1とすると、JMTRのウラン量は、**0.003**程度です。

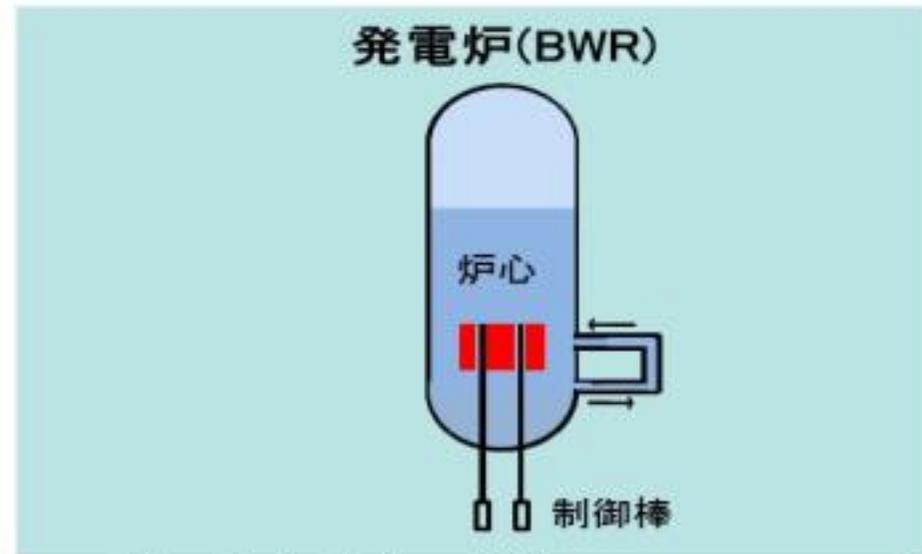
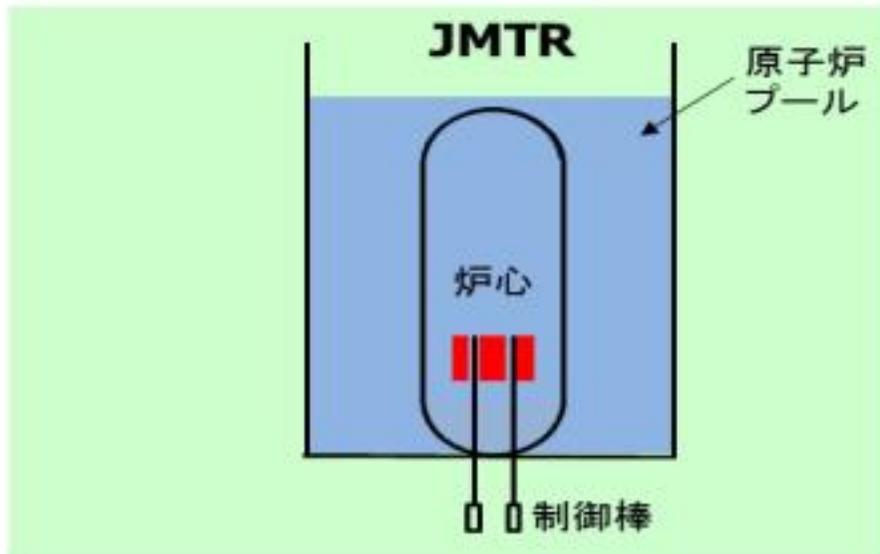
炉心内の核分裂生成物量



炉心には、ウランの核分裂により核分裂生成物(FP)がたまります。発電炉のFP量を1とすると、JMTRのFP量は**0.04**程度です。

# 【燃料の安全性】

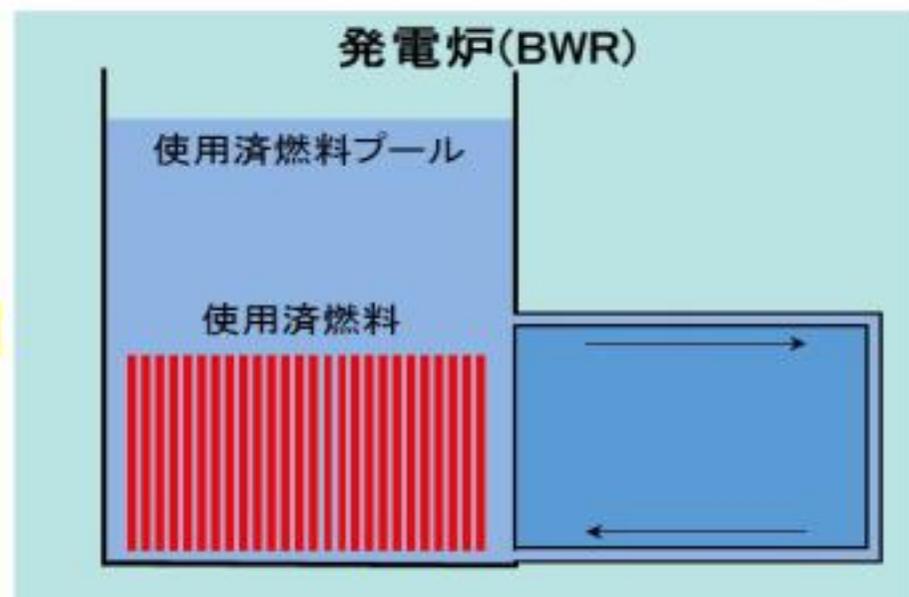
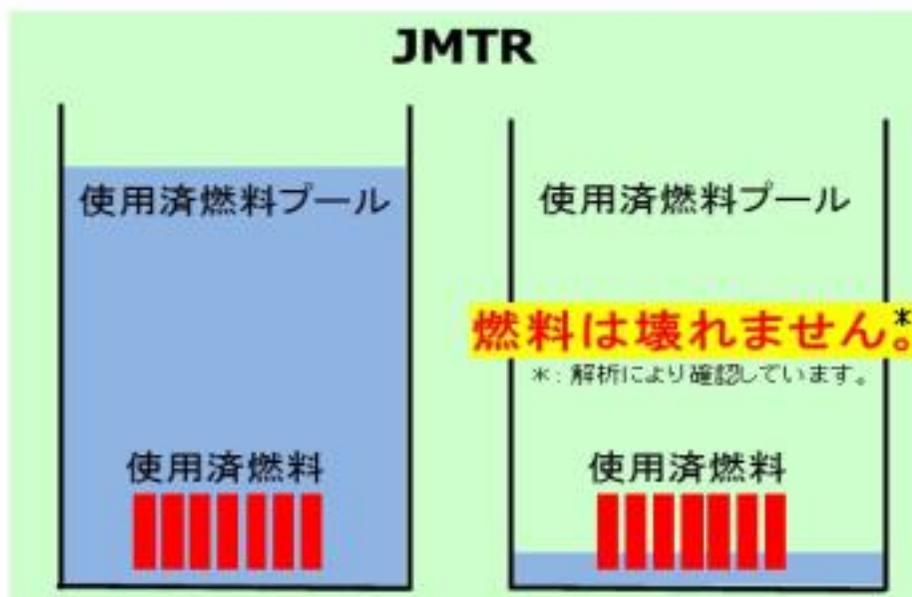
	JMTR	発電炉(BWR)
原子炉運転中の冷却	強制循環冷却	強制循環冷却
地震時の緊急停止設定値	25Gal* (震度4で原子炉停止)	135Gal (水平), 100Gal (上下)
炉停止後の炉心冷却水の強制循環の必要性	なし	あり
冷却水強制循環不全時における燃料破損可能性	なし	あり



\* : Gal(ガル)は加速度の単位。1 Gal = 0.01 m/s<sup>2</sup>

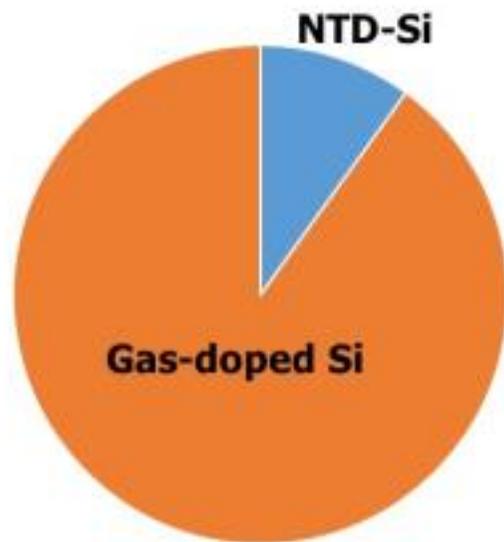
## 【使用済燃料保管時の安全性】

	JMTR	発電炉(BWR)
使用済燃料の保管雰囲気	水中	水中
保管時水循環の必要性	なし	あり
プール水位低下による燃料破損の可能性	なし	あり

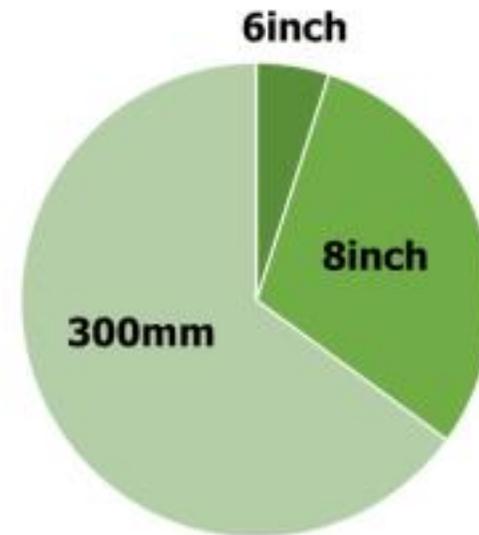


# Si半導体の製造現状

Si半導体製造量(事業規模約2兆円)に対して、Si単結晶を中性子照射することによって製造されるSi半導体(以下、NTD-Siと称す)の割合は現在約10%である。



By Material



By Size of Single Crystal

	6inch	8inch	300mm
Gas-Doped Si	○	○	○
NTD-Si	○	○	×