

世界のMo-99の供給 現状と課題

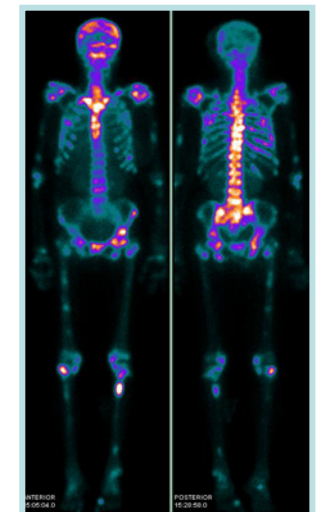
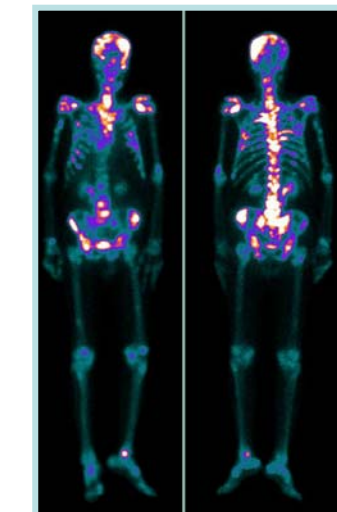
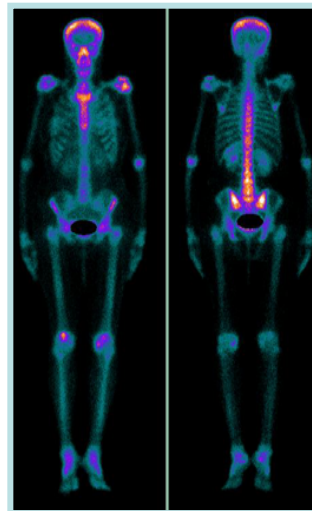
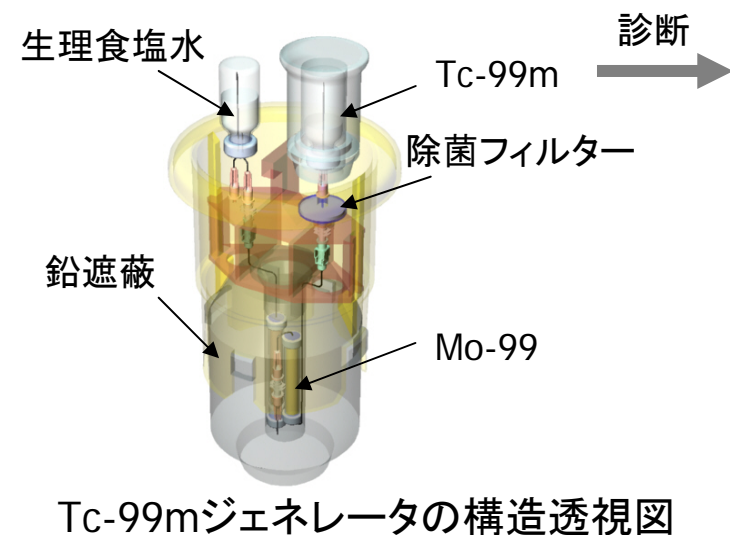
平成20年(2008年)11月18日

源河次雄

元 FNCA Tc-99mジェネレータ開発プロジェクトリーダー
(株)化研 顧問

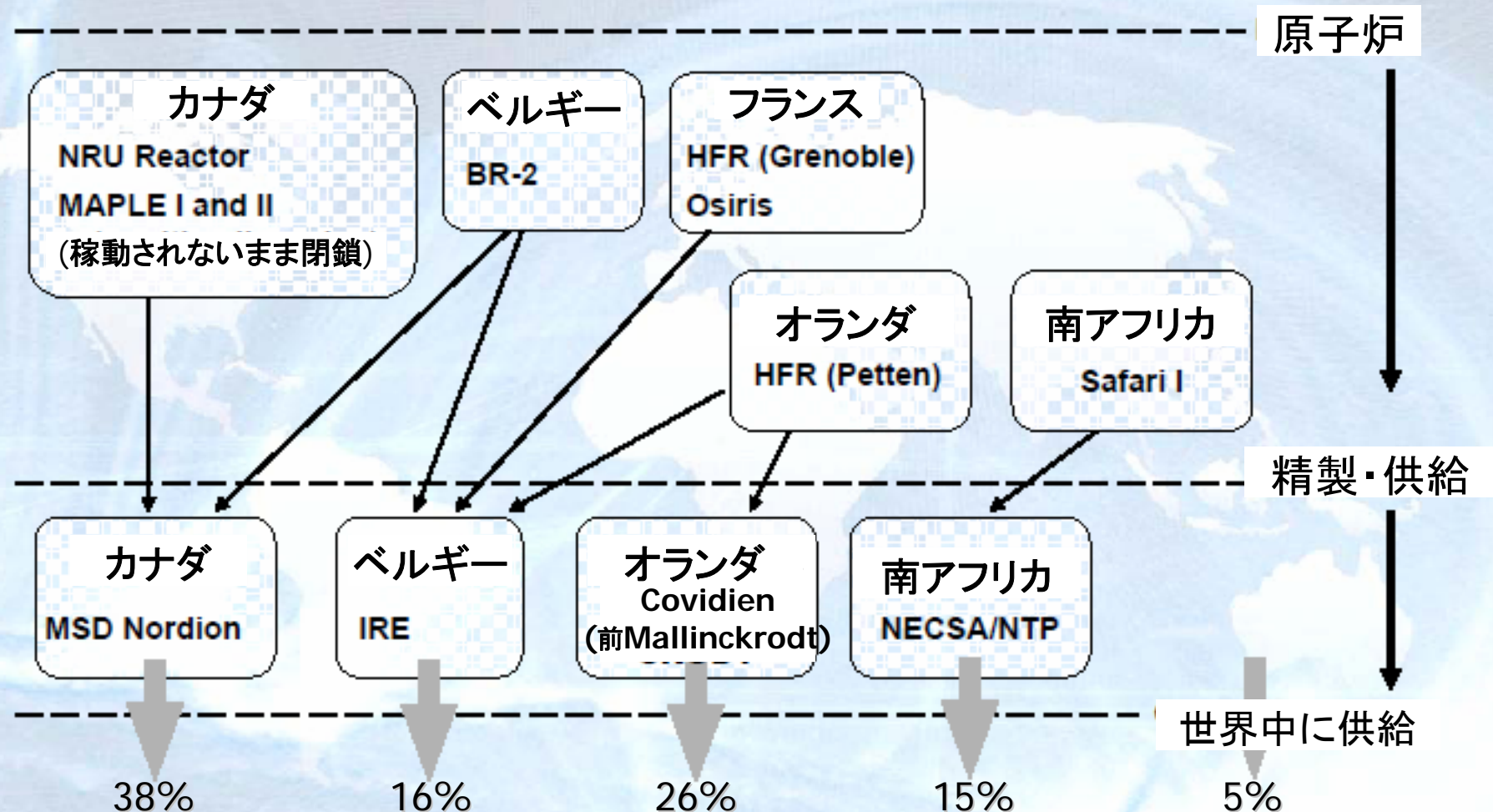
Tc-99mは世界中で最も多用されている医用ラジオアイソトープである

- Mo-99(半減期66時間) → Tc-99m(半減期6時間)
- 核医学検査の80%以上はTc-99mを使用して行われている。
- 世界の核医学診断件数: 約65,000件/日 約2,500万件/年
わが国では 約100万件/年
- Mo-99の5大供給国: カナダ、オランダ、ベルギー、フランス、南アフリカ
- Mo-99の4大供給業者: MDS Nordion, Covidien, IRE, NTP
わが国も米国もMo-99全量を海外からの輸入に頼っている。
- 殆ど(>95%)のMo-99は高濃縮ウラン(HEU)の核分裂により製造される。
- 製造用原子炉の老朽化とテロの脅威がMo-99供給の不安定要因となっている。



世界のMo-99製造供給の流れ

全需要の95%の製造に照射ターゲットとして高濃縮ウラン(HEU)を使用



世界の放射性医薬品メーカーに供給 GE Healthcare, Schering, 富士フィルムRI ファーマ, 日本メジフィジックス, Bristol Meyers Squibb, Cardinal Health, Bracco Diagnostics 等々

Mo-99を製造している主な原子炉と供給業者

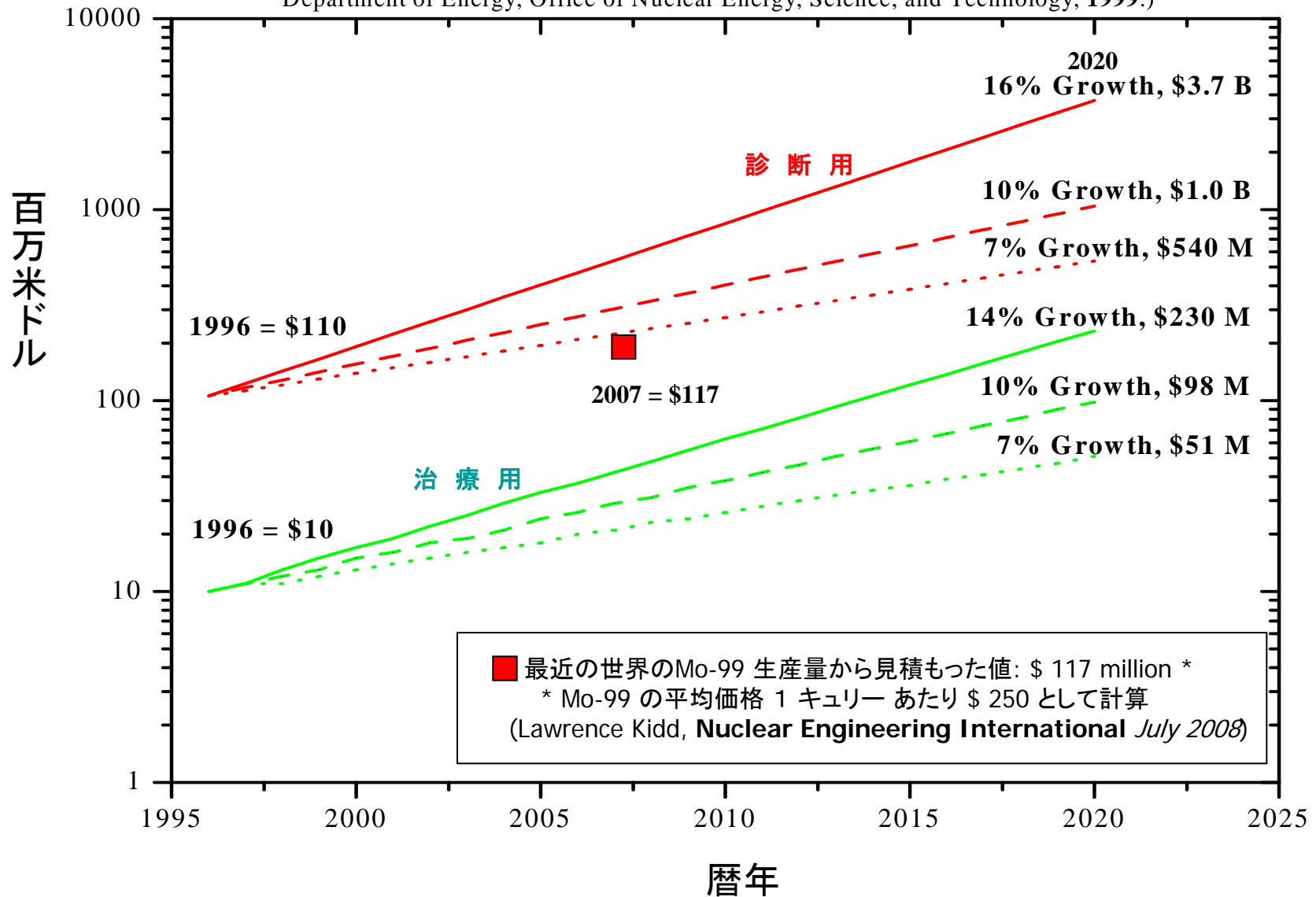
古い原子炉5基と供給業者4社で世界需要の95%をカバーしている

Mo-99製造量*: 17.3 PBq (468,000 Ci) * Nuclear Engineering International July 2008

国 名	原子炉	熱出力 (MW)	初臨界	稼働率 (%年)	供給業者	充当率 (%世界需要)
カナダ	NRU	135	1957	86	MDS-Nordion	38
オランダ	HFR	45	1961	79	Covidien, IRE	16 10
ベルギー	BR2	100	1961	31	Covidien, IRE	10 3
フランス	Osiris	70	1964	60	IRE	3
南アフリカ	SAFARI-1	20	1965	86	NTP	15
その他	OPAL, RA-3, GAS-MPR, HWRR-II, Dhruva 他					5

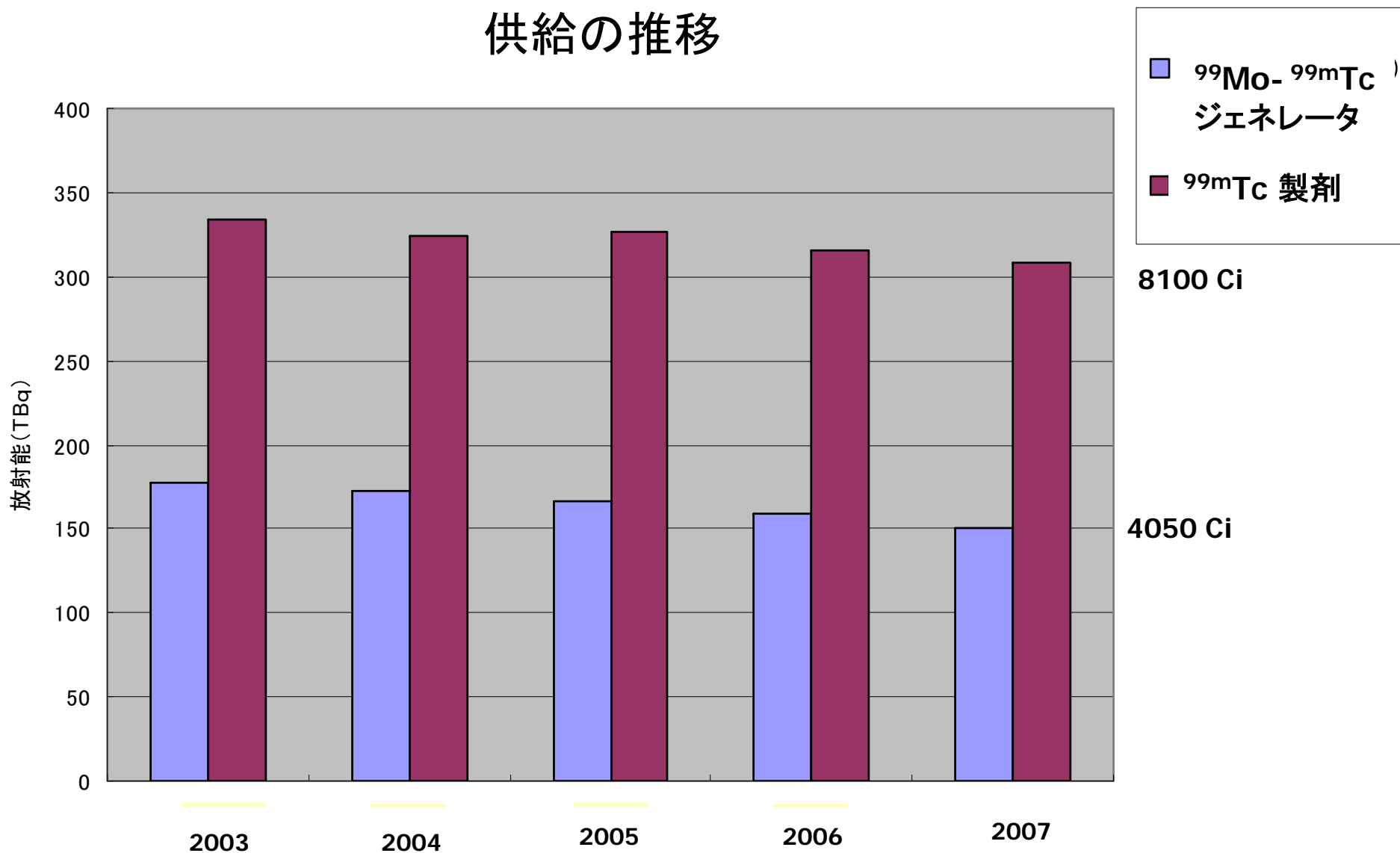
世界の医用ラジオアイソトープ市場予測

(Adapted from *Expert Panel: Forecast Future Demand for Medical Isotopes*.
Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Science, and Technology, 1999.)



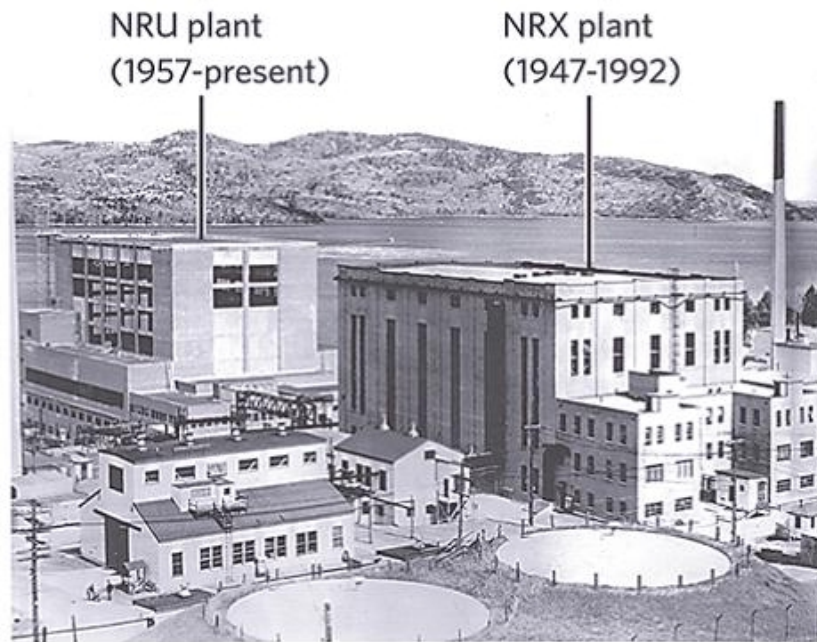
わが国の ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレータ及び $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 製剤

供給の推移



相次ぐMo-99生産炉および施設のトラブル

- NRU 2007年11月 緊急時冷却ポンプ電源系統不備発覚、運転停止。Mo-99供給確保のため緊急立法により整備途中の運転再開命令、規制当局委員長は再開に同意せず更迭。
- MAPLE-1、2 2008年5月廃炉決定。老朽化したNRUの代替炉として建設したが、出力反応度係数の問題を解明できず、資金的にも当初予算を大幅に超過した。後継炉を失ったNRUの運転許可期限(2011年)延長も不透明。
- HFR-Petten 2008年8月一次冷却系底部構造の一部腐食変形、現在修理中(2009年2月中旬まで)。
- IRE (Mo-99プロセス施設) 2008年8月スタックからI-131環境放出、施設使用出来ないためBR2もターゲット照射休止中であつたが、11月4日再稼動許可。
- OPAL 2007年4月に完成したが7月に燃料板位置ずれ発見、設計し直して再装荷、重水反射槽内冷却用軽水滲み出し問題も未解決、建設請負会社INVAPと補償問題交渉中。今年末アイソトープ製造開始見込み。



1954年、NRU建設中に撮影

NRU (National Research Universal)

世界のMo-99 供給の最大シェアを誇る。MAPLE炉計画の打ち切りにより、MDS Nordionに対する今後40年間のMo-99供給を担い続けることになったが運転許可期限は2011年で切れる。

MAPLE (Multipurpose Applied Physics Lattice Experiment)

当初予算は1億4千万ドルであったが、稼働せぬまま8年経過後には3億5千万ドルにまで膨れあがった。稼動すれば1基のみで世界の需要を充たせる筈であったが、出力反応度係数の問題を克服できず2008年5月、AECLは計画を中止した。



核拡散防止条約(NPT)対応

現在Mo-99の大量製造は、殆どの場合核兵器級高濃縮ウラン(HEU)ターゲットの原子炉照射により得られているが、核拡散防止のため IAEA, US DOE またはNGO 主導によりHEU削減のための様々な取り組みがなされている。

RERTR (Reduced Enrichment for Research and Test Reactors) はHEUの民生利用を削減または廃止することを目指す。原子炉燃料のLEU化は順調に推移しているが、Mo-99製造用ターゲットのLEU化は遅々として進まない。

GTRI (Global Threat Reduction Initiative) が2001年9月11日の米国内同時多発テロを機に創設された。

IPPNW (International Physicians for the Prevention of Nuclear War) 核戦争防止国際医師会議(1985年ノーベル平和賞受賞)では、ICAN (International Campaign to Abolish Nuclear Weapons) による核兵器廃絶国際キャンペーンの一環として、医用放射性医薬品のHEUからの脱却を訴えている。

HEUの輸送及び貯蔵は世界的な懸念材料となっている。従ってHEUの民生利用は今後一層制約を受けるであろう。

米国のジレンマと対策

- 米国は1989年以降、Mo-99/Tc-99mの国内需要の全量をHEUから製造された製品の輸入に依存している。
- 米国から外国に対するMo-99製造用HEUの輸出量は年間約85kgに達する。
- 米国は自国医療機関へのTc-99m供給を確保するため、海外のMo-99製造業者に対し核兵器級HEUを輸出せざるを得ない。
- 米議会はSchumer 修正法を可決し、可及的速やかにLEUによる製造法に移行すること等の条件を付してHEUの輸出を許可している。
- 米国NRC (National Research Council) では、MAPLE炉のために輸出したHEUの返却を求める動きが出ている。
- 米国核医学会SNM (Society of Nuclear Medicine) は、医用RIの全面的な海外依存に対する危機意識が高まり、学会内にタスクフォースを立ち上げて国内自給に関するフィージビリティスタディを開始した。

Mo-99製造用ウランターゲット低濃縮化の問題点

- ・ 同量のMo-99を製造する場合、LEUターゲットはHEUの約5倍のウラン量を必要とする。従って廃棄物量も5倍に増える。
- ・ LEUターゲット中のPu-239生成量はHEUの約25倍。
- ・ LEU仕様施設の建設、従来Mo-99供給と並行して行うか、その間供給中断か。

ターゲット	HEU	LEU
^{235}U 濃縮率	93%	19.8%
^{99}Mo 収量	530 Ci	540 Ci
全ウラン含有量	16 g	94 g
^{235}U 含有量	15 g	18 g
^{239}Pu 生成	30 μ Ci	720 μ Ci
$^{234}, ^{235}, ^{238}\text{U}$	1280 μ Ci	840 μ Ci
全 α 放射能	1310 μ Ci	1560 μ Ci

原料⁹⁹Mo 製造コスト

(ANSTO: Rex Boyd氏による相対比較＊)

＊ R.E. Boyd, *The Gel Generator, Appl. Radiat. Isot.*, Vol.48, No.8, 1997

	⁹⁹ Mo 製造コスト (US\$/年)	
	²³⁵ U (n, f) ⁹⁹ Mo	⁹⁸ Mo (n, γ) ⁹⁹ Mo
ターゲット費	35,000	1,200
照射、製造プロセス	227,000	12,000
廃棄物処理	122,000	80
合 計	384,000	13,300
製造量(Ci)	6700 Ci	16,000 Ci
Ci当りのコスト	\$57/Ci	\$0.83/Ci

現在の (n, f)⁹⁹Moの平均的な供給価格は \$ 250/Ci＊

＊ Lawrence Kidd, *Curies for Patients, Nuclear Engineering International* July 2008

FNCAの枠組みでTc-99mジェネレータプロジェクト実施(2001~2006年)

中国

HWRR-II

- Heavy water
- 15 MW
- 2.4E14

(CARR)

- Under construction
- 60 MW



韓国

HANARO

- Pool type
- 24 MW (30 MW)
- 4.5E14



インドネシア

RSG-GAS

- Pool type
- 15 MW (30 MW)
- 2.4E14



TRIGA-2000

- 2 MW
- 5.1E13

マレーシア

TRIGA-RTP

- TRIGA MKII
- 1 MW
- 2.0E13



日本



JRR-3M

- Pool type
- 20 MW
- 2.7E14



JMTR

50 MW

タイ

TRR-1/M1

- TRIGA Mark III
- 1.2 MW (2 MW)
- 3.1E13



(ONRC)

- Planning
- 10 MW

ベトナム

DALAT RR

- Pool type
- 500 kW
- 2.1E13



バングラデシュ

TRIGA MARK II

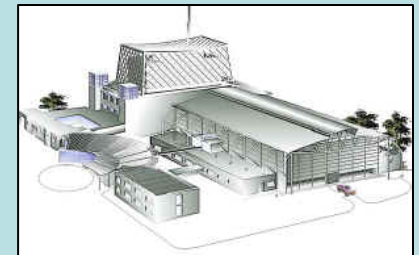
- 3 MW
- 5.6E13



オーストラリア

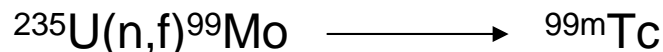
OPAL

- 20 MW



Mo-99の製造法と新しい **PZC**-タイプ Tc-99m ジェネレータ

濃縮ウラン-235の核分裂



非常に高い比放射能: $\sim 10,000 \text{ Ci/g} \cdot ^{99}\text{Mo}$
 高価な ^{99}Mo 原材料: $\sim \text{US\$ } 250/\text{Ci} \cdot ^{99}\text{Mo}$
 大量の放射性廃棄物: Sr, Zr, Ru, I, Xe, Cs, Nd

天然モリブデンの中性子放射化



低い比放射能: $\sim 2 \text{ Ci/g} \cdot ^{99}\text{Mo}$
 安価な ^{99}Mo : 核分裂法の $\sim 1/70$
 少ない放射性廃棄物: 核分裂法の $\sim 5\%$

低コストの $(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$ (低比放射能)

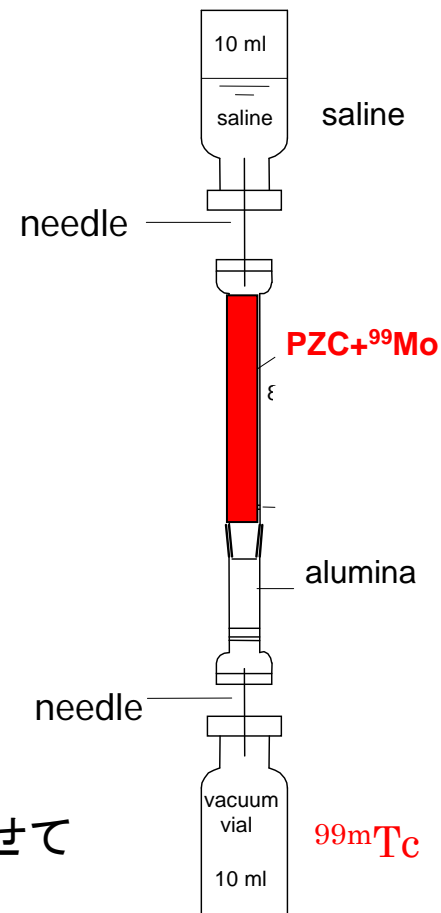
新しい吸着材 **PZC** (高い吸着能力)

実用的なTc-99mジェネレータ

と

を組み合わせる

を造る

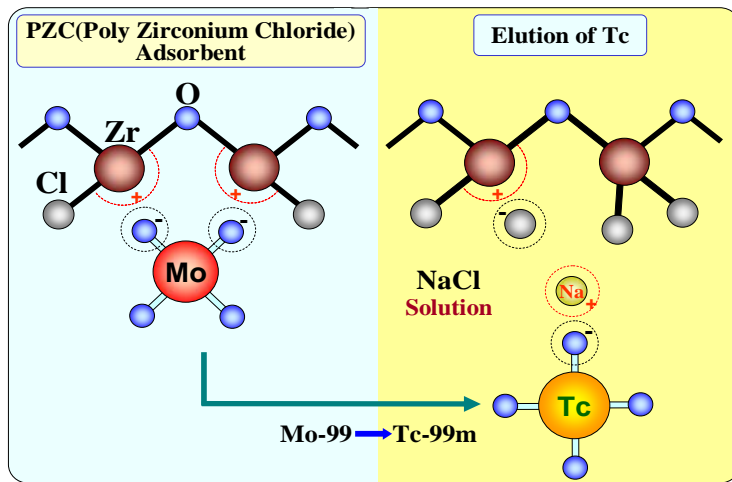


ジェネレータ概念図

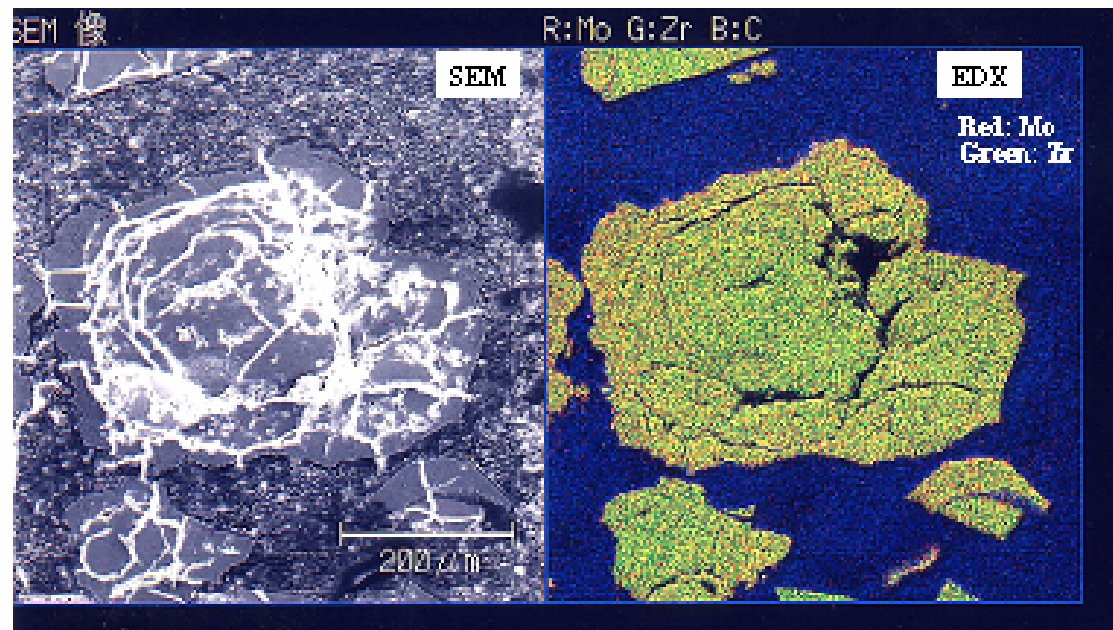
Poly Zirconium Compound

PZC の Mo に対する吸着能力は
従来のアルミナに比べて約150倍

KAKEN Nov. 2004



モリブデン吸着後のPZC顆粒断面解析画像



原子力機構・化研共同出願

米国特許 5681974

国内特許 2857349

SEM: 走査型電子顕微鏡

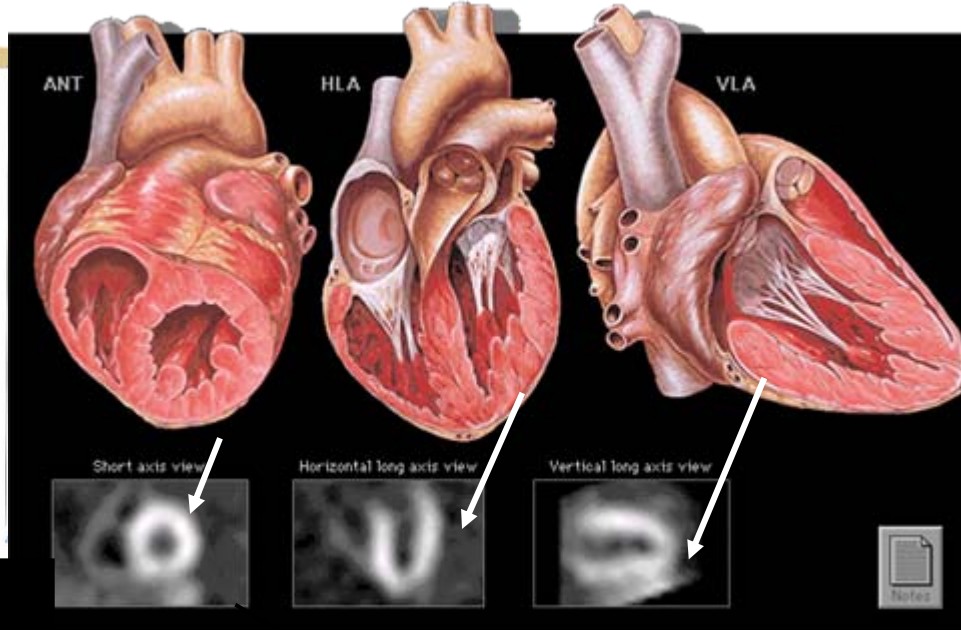
EDX: 電子線回折X線アナライザー

赤: Mo 緑: Zr

PZC型ジェネレータから溶出したTc-99m による臨床試験例 FNCAプロジェクトの成果



全身像(PZC-Tc99m)



臨床試験を行った
バンドン市ハッサ
ン・サディキン病院
核医学センター

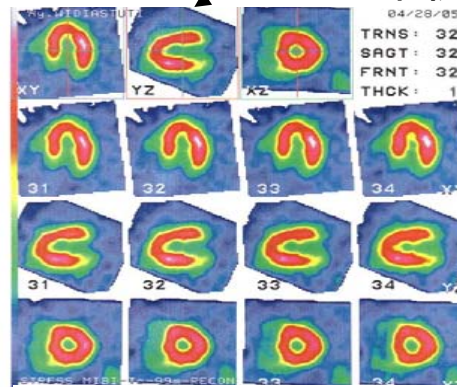


SPECT



www.med.yale.edu/

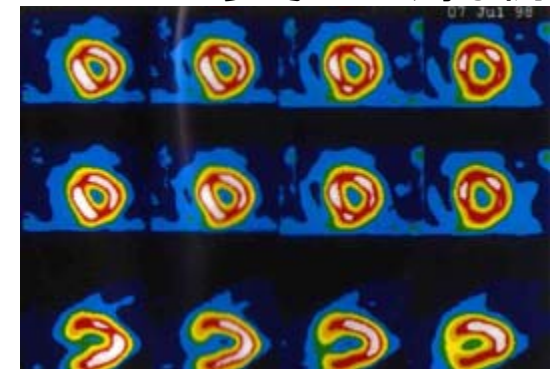
正常例



(PZC-Tc99m-MIBI)

心
筋
血
流
検
査

<参考> 重篤な例



(従来法Tc-99mによる撮像)

来るべきMo-99の供給危機に備えて

- ・米国では: ミズーリ大学の研究炉(MURR)を4千万ドルを投じてアップグレードし、6年以内にMo-99の国内需要の50%を賄うという計画がある。
- ・欧州では: AIPEP (Association of Imaging Producers and Equipment Suppliers)が域内原子炉の相互利用体制を構築しようとしている。新専用炉建設も視野に。
- ・日本では: 原子力機構がJMTR運営・利用委員会の下に医・薬学界、医薬品業界、関連団体などで構成された「Mo-99国産化検討分科会」を設置し、国産化に向けた技術的検討を開始。
- ・IAEAでは: Mo-99の需要の増大にも拘わらず主要な生産炉が老化していることに鑑み、研究炉の信頼性向上と効率向上に資するための運転管理手引書を刊行した。

→ まとめに代えて

- ・新規に立ち上げるMo-99の国内生産は、ウランの核分裂反応によらない、天然モリブデンの中性子放射化による製造法を採用することが望ましい。
- ・原子力機構と化研が共同開発し、アジア原子力協力フォーラム(FNCA)で実証試験を行ってきた高性能Mo吸着材PZCを活用することにより、天然モリブデンを用いて Tc-99m の国内需要の一定量を補完することができる。