

粒子加速器と原子力

—安全な原子力システムの開発—

井上 信

科学カフェ京都

2010.2.13

粒子加速器

- ・原子核物理学のための実験装置として開発された
 コッククロフト・ウォルトン 最初の原子核人工変換反応
 KEK-Bfactory 小林・益川理論の確認
- ・現在では多くの分野に利用されている
 日本の加速器約1000台のうち9割は医療用の電子線形加速器

原子力

核エネルギー

核分裂 発電用原子炉

核融合 ITER

(いずれの核反応も核兵器として利用されている)

放射線の利用

RI

原子炉 研究・試験用原子炉

加速器

量子ビーム

光子・粒子などのビームの総称として最近使われるようになった言葉

原子の構造

- 長岡半太郎

土星モデル(1904年)

- ラザフォード

ガイガー・マースデンの実験を説明するために
原子核の存在を発見(1911年)

(原子模型の最終的解決はボーアが行った)

粒子加速器を作る気運が高まる！！

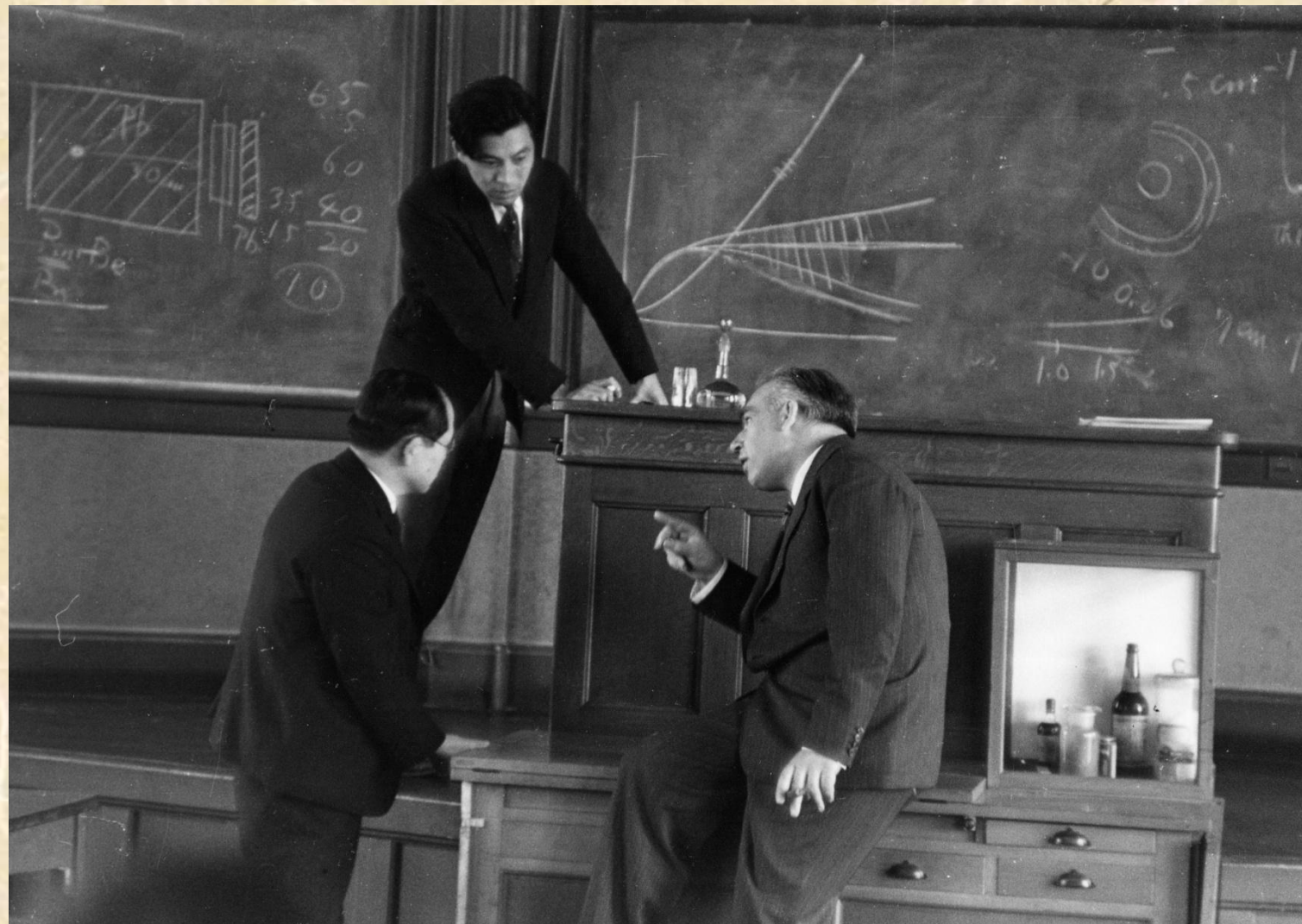


仁科芳雄

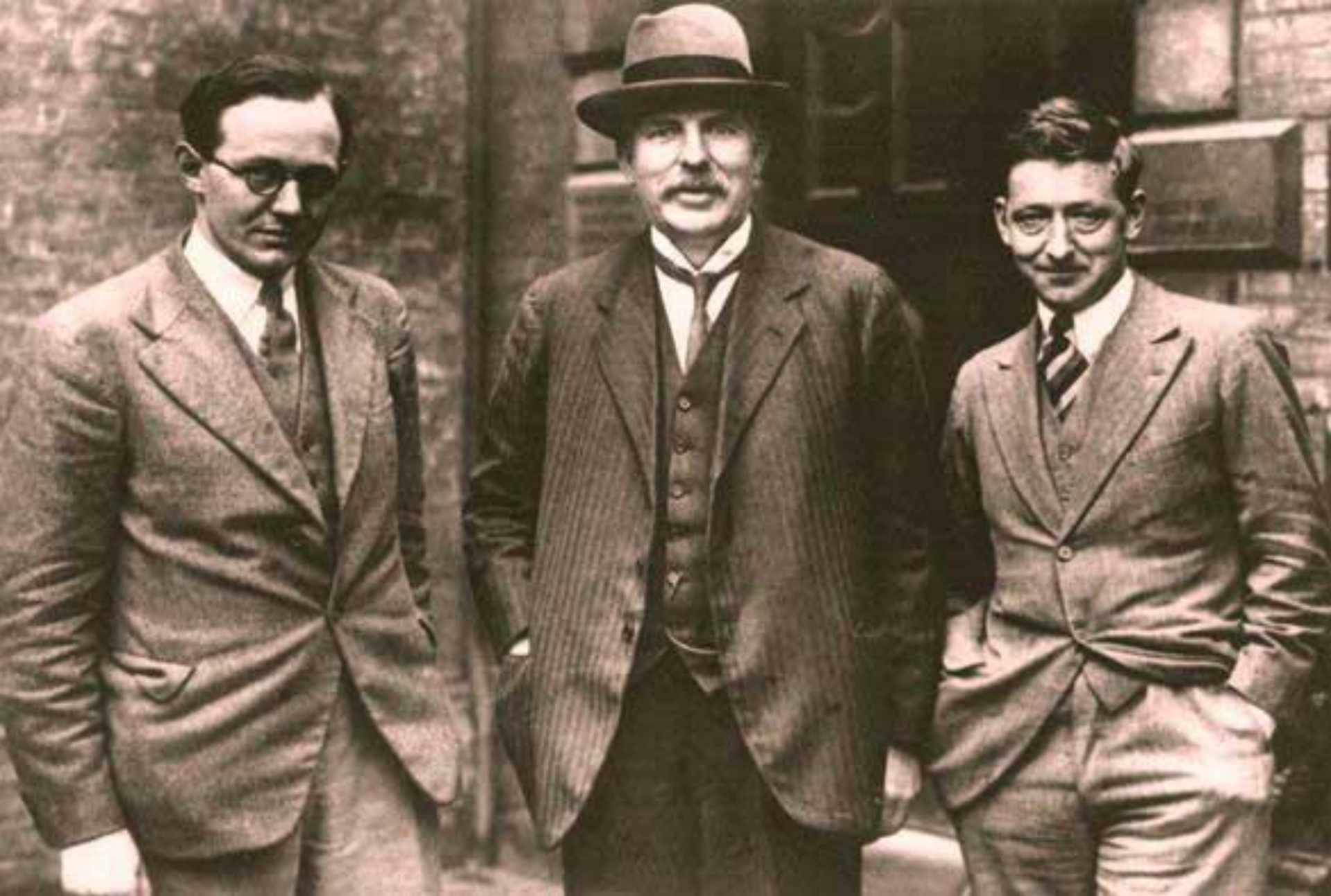
ヨーロッパで7年間近代物理学を身につけ
帰国後理研の長岡半太郎の研究室に所属
その後、理研の中心人物となる日本近代物理学の父

湯川・朝永も仁科から量子力学を学ぶ

1937, Bohr in Japan



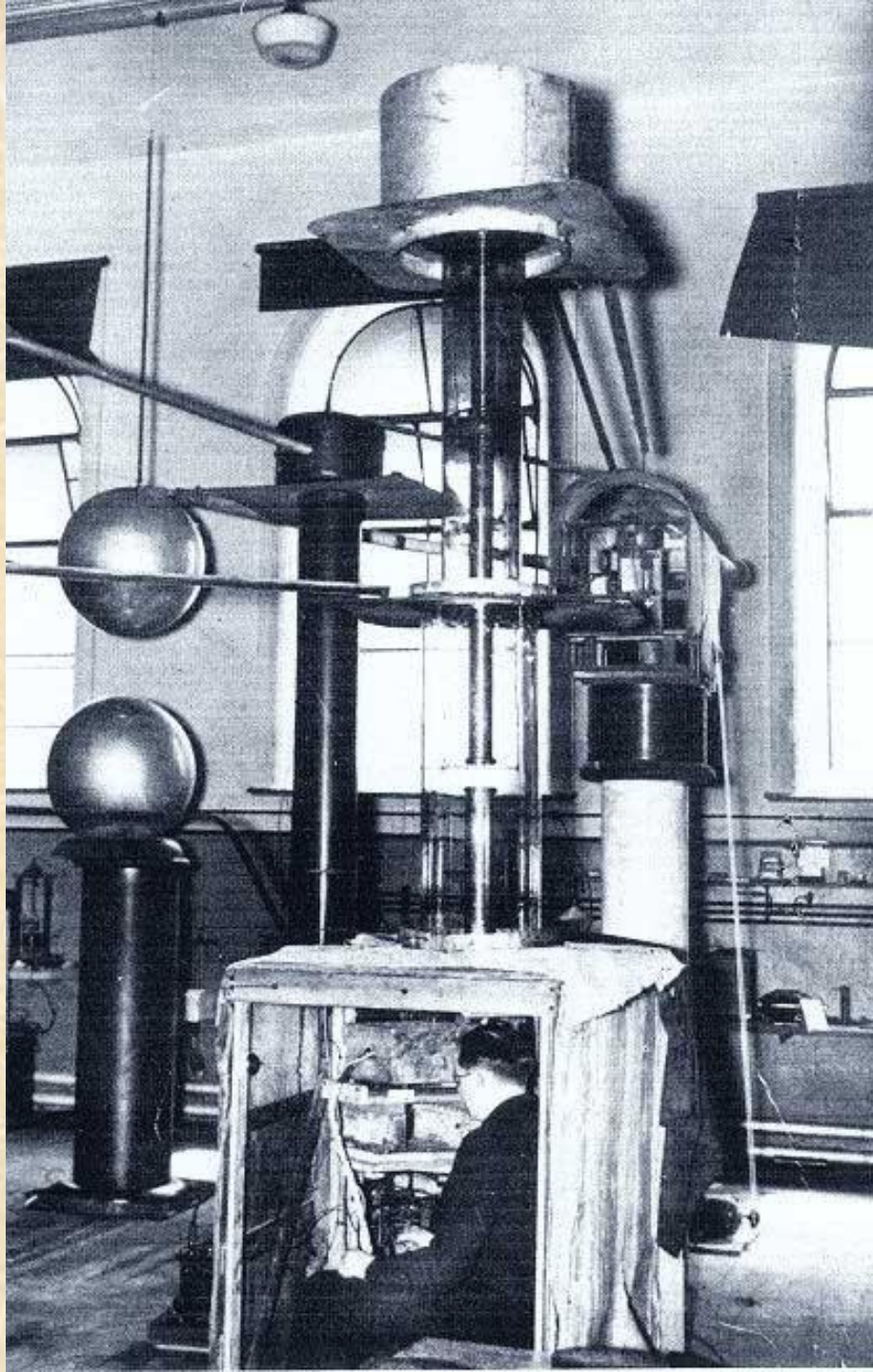
仁科芳雄 菊池正士 ボーア



John Cockcroft

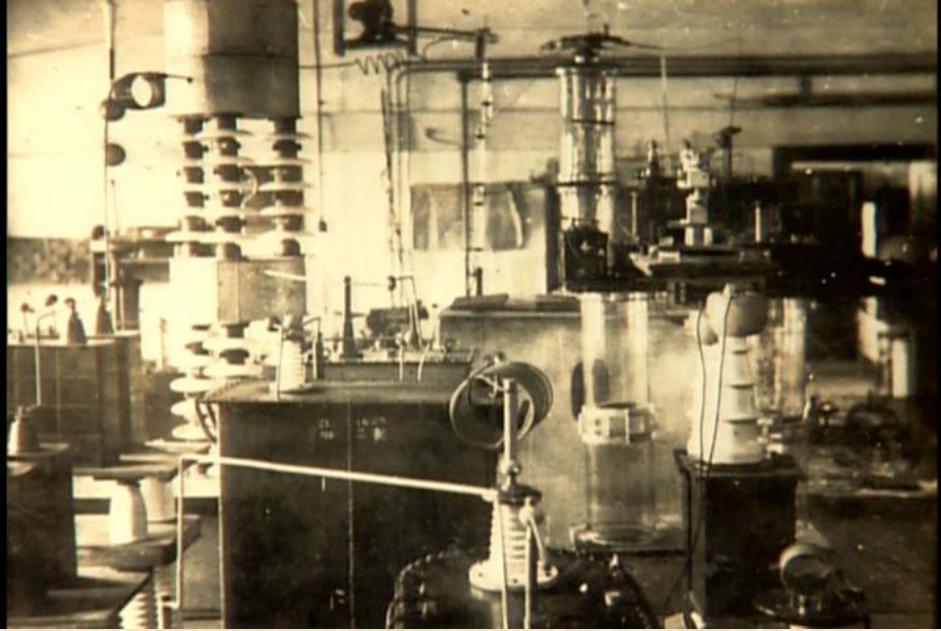
Ernest Rutherford

E.T.S. Walton.



加速器による原子核研究 の始まり

コッククロフトとウォルトンが
作った加速器
(1932年)



台北帝大の Cockcroft-Walton 型加速器



荒勝文策と木村毅一



京大での荒勝文策(米国立公文書館所蔵)



現在の台湾大学の展示室

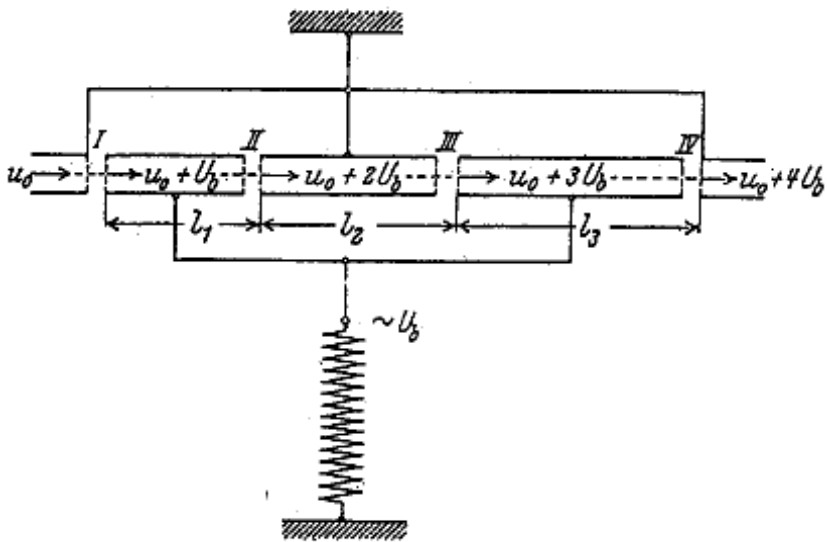
大阪帝国大学理学部

湯川秀樹

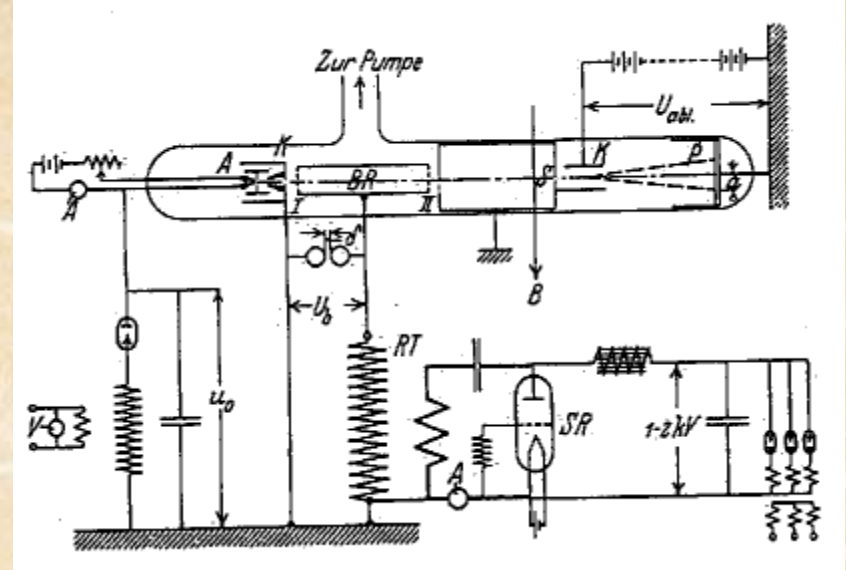
伏見康治 坂田昌一



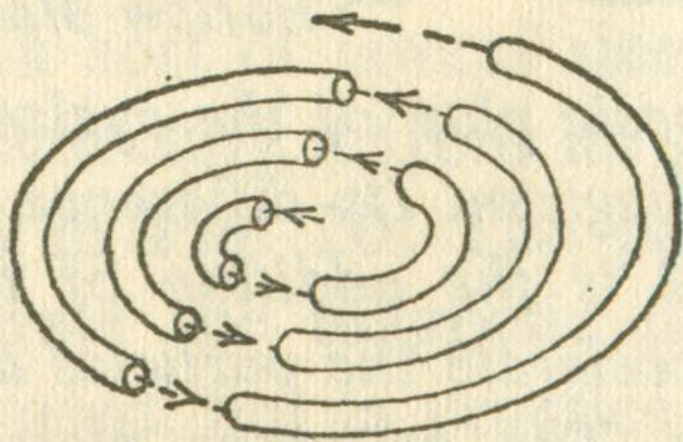
菊池正士



Wideroeのリニアック原理図



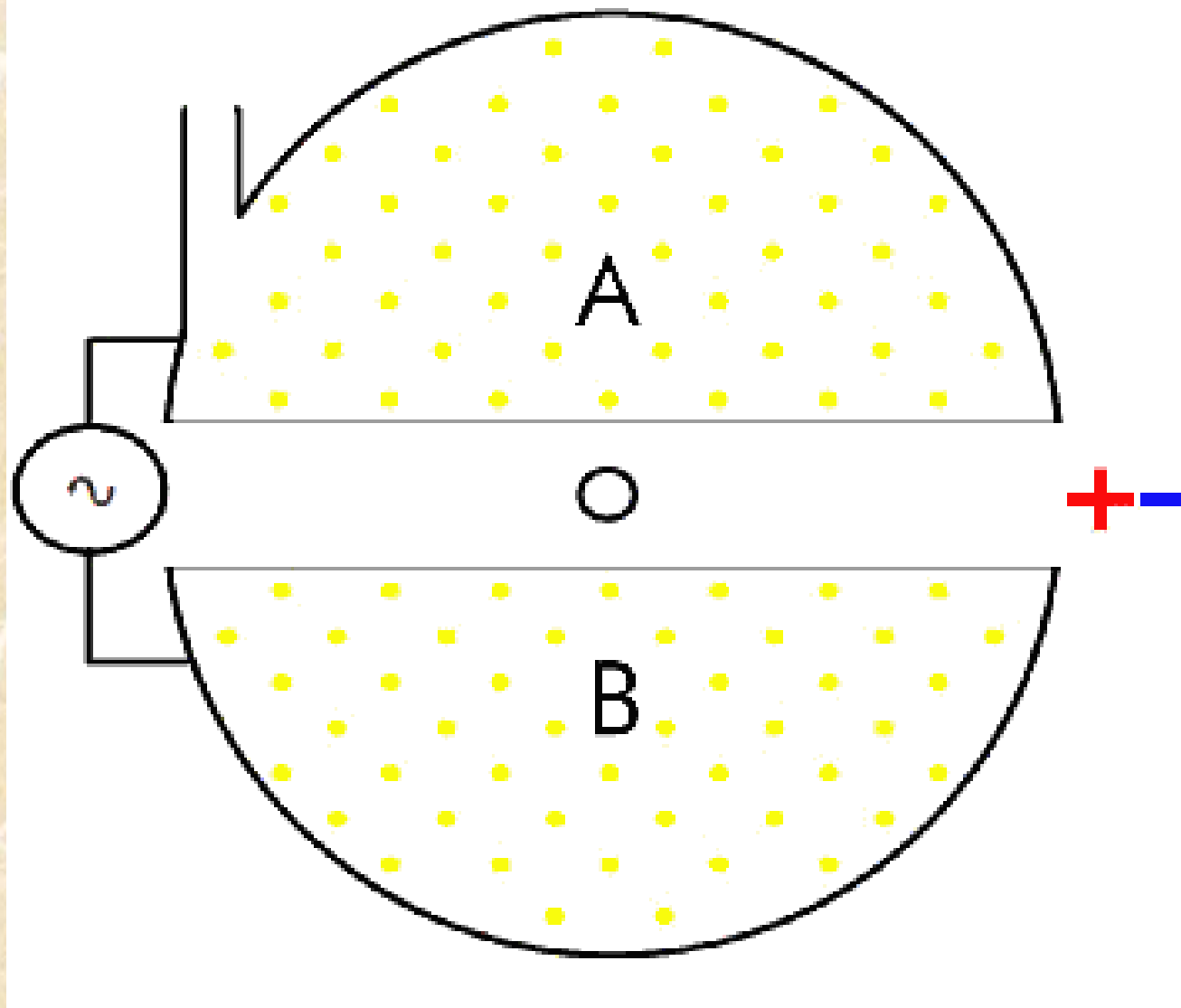
Wideroeのリニアック回路構成図(1928年)



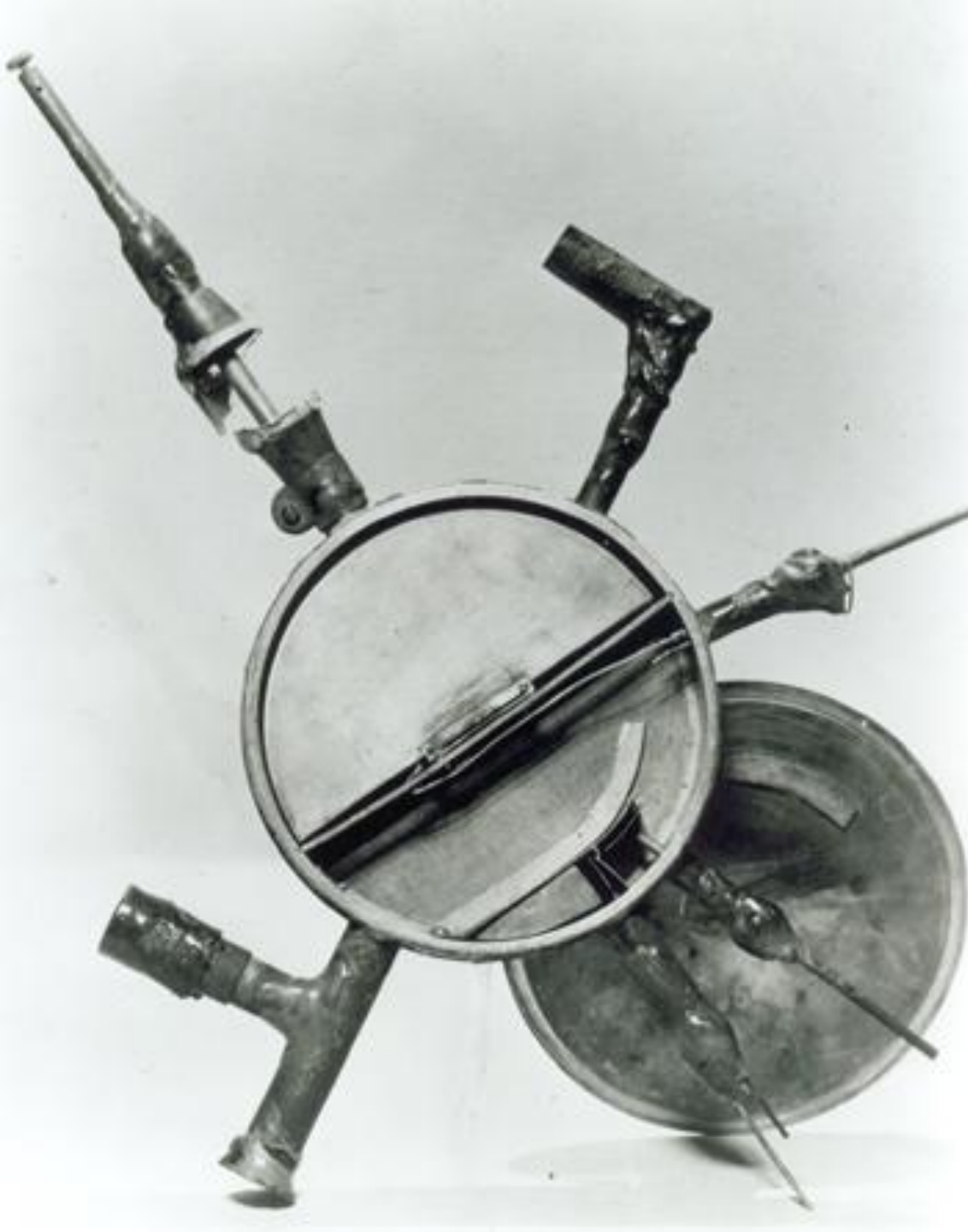
Lawrenceの描いた絵

Not being able to read German easily, I merely looked at the diagrams and photographs of Wideroe's apparatus and from the various figures in his article readily realized understood ~~the~~ his general approach to the problem - i.e. the multiple acceleration of the positive ions by ^{appropriate} application of radio frequency oscillating voltages to a series of cylindrical electrodes

Wideroe論文にヒントを得たことを記したLawrenceのメモ

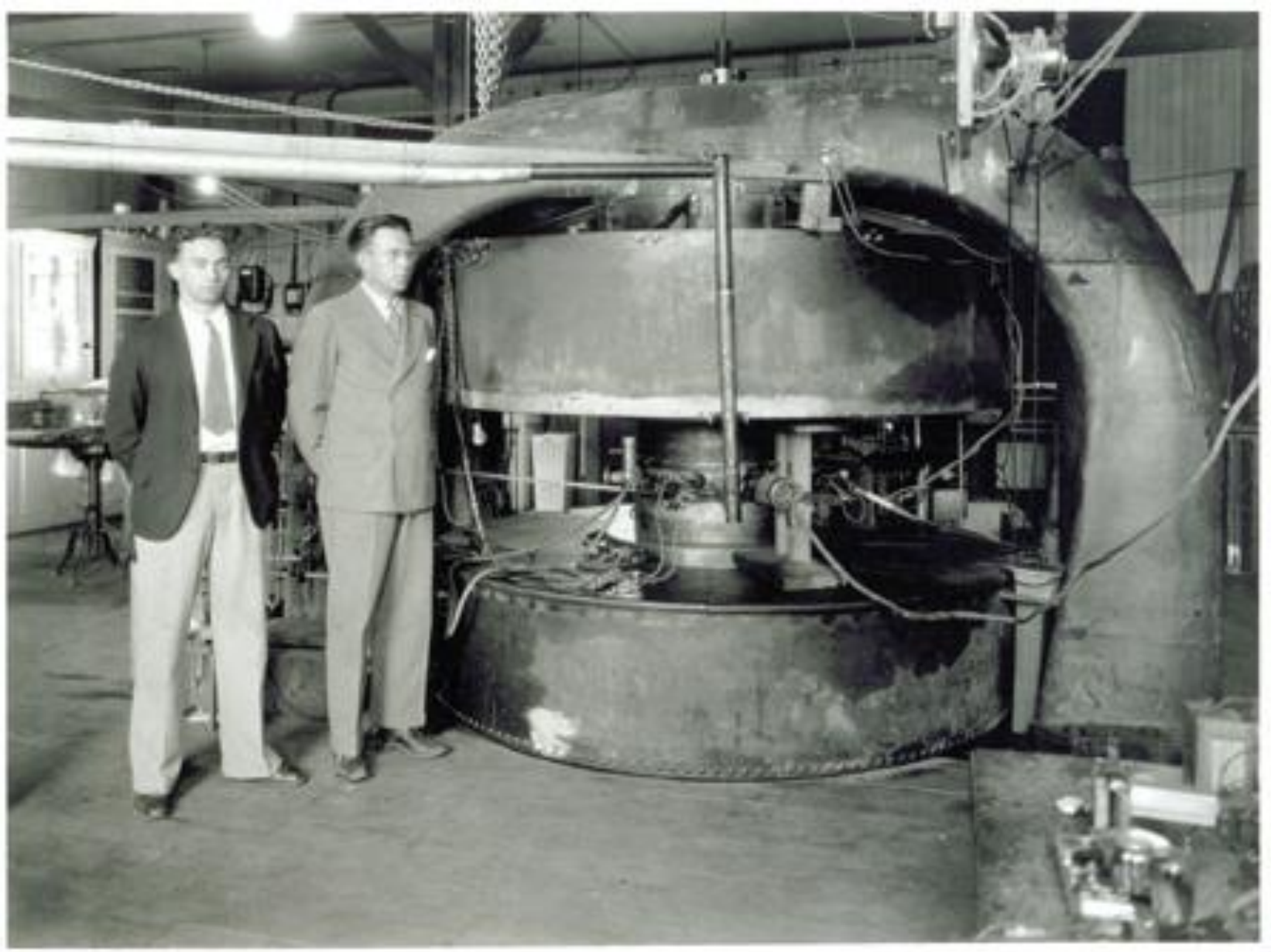


サイクロトロン

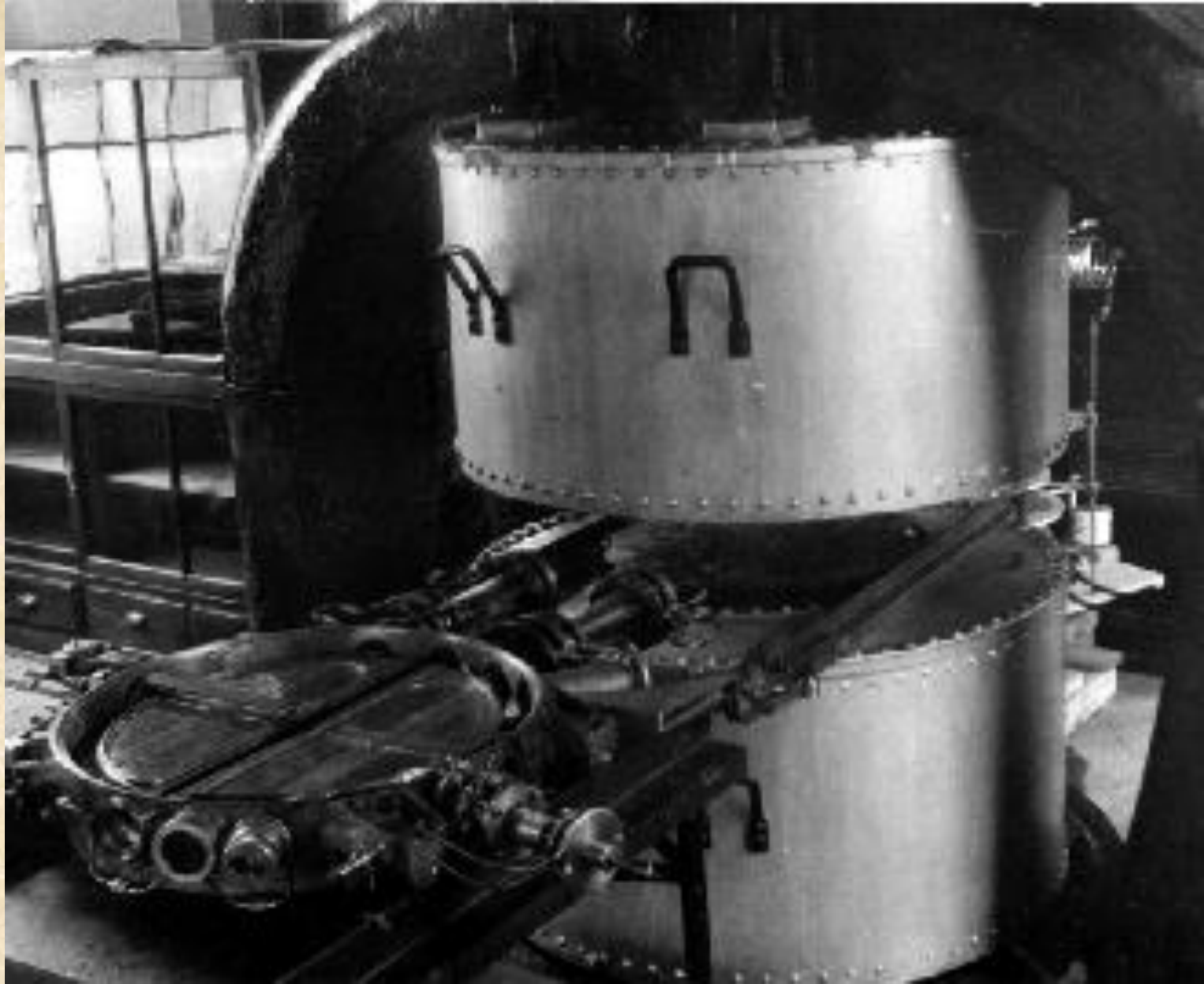


Lawrenceの学生
だった Livingston
が作った4インチの
サイクロトン加速
箱(1931年)

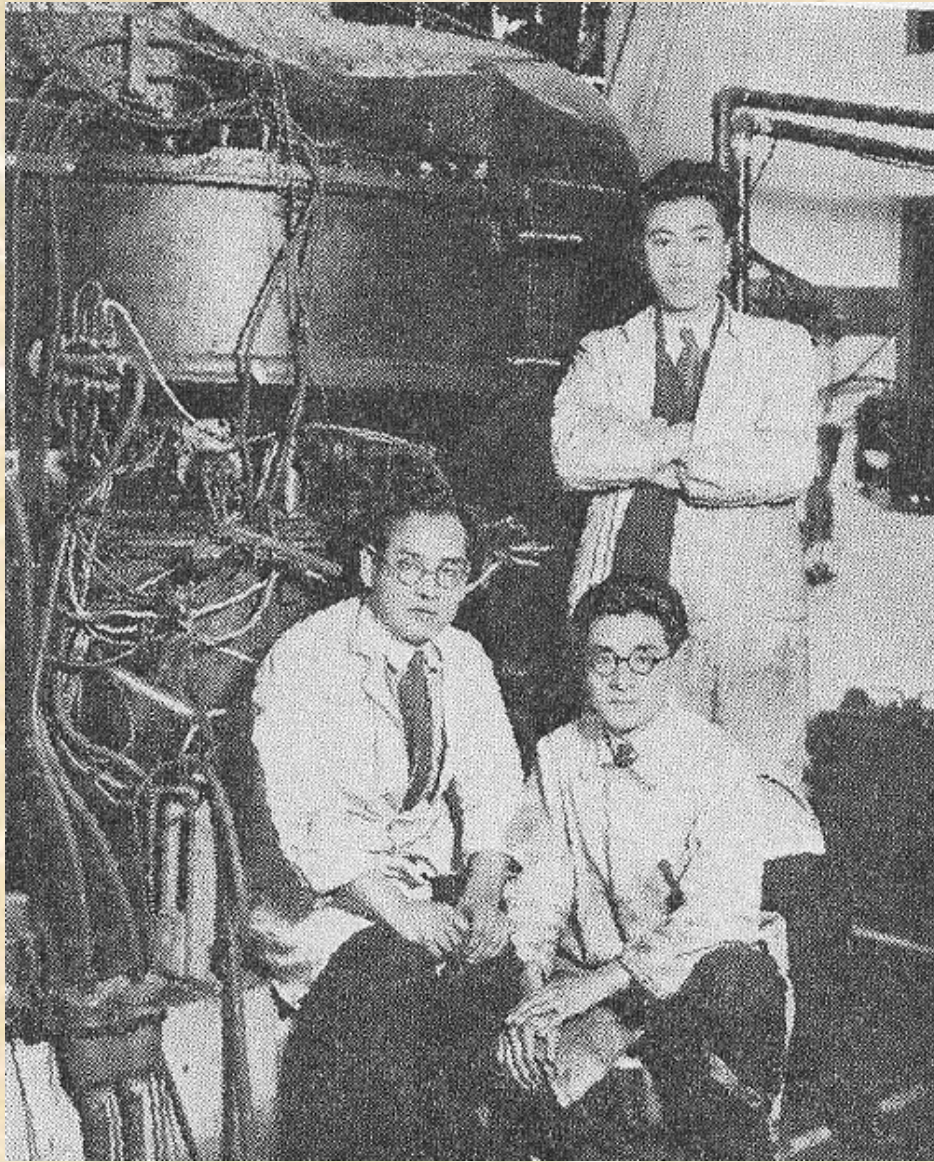
80keV加速を確認



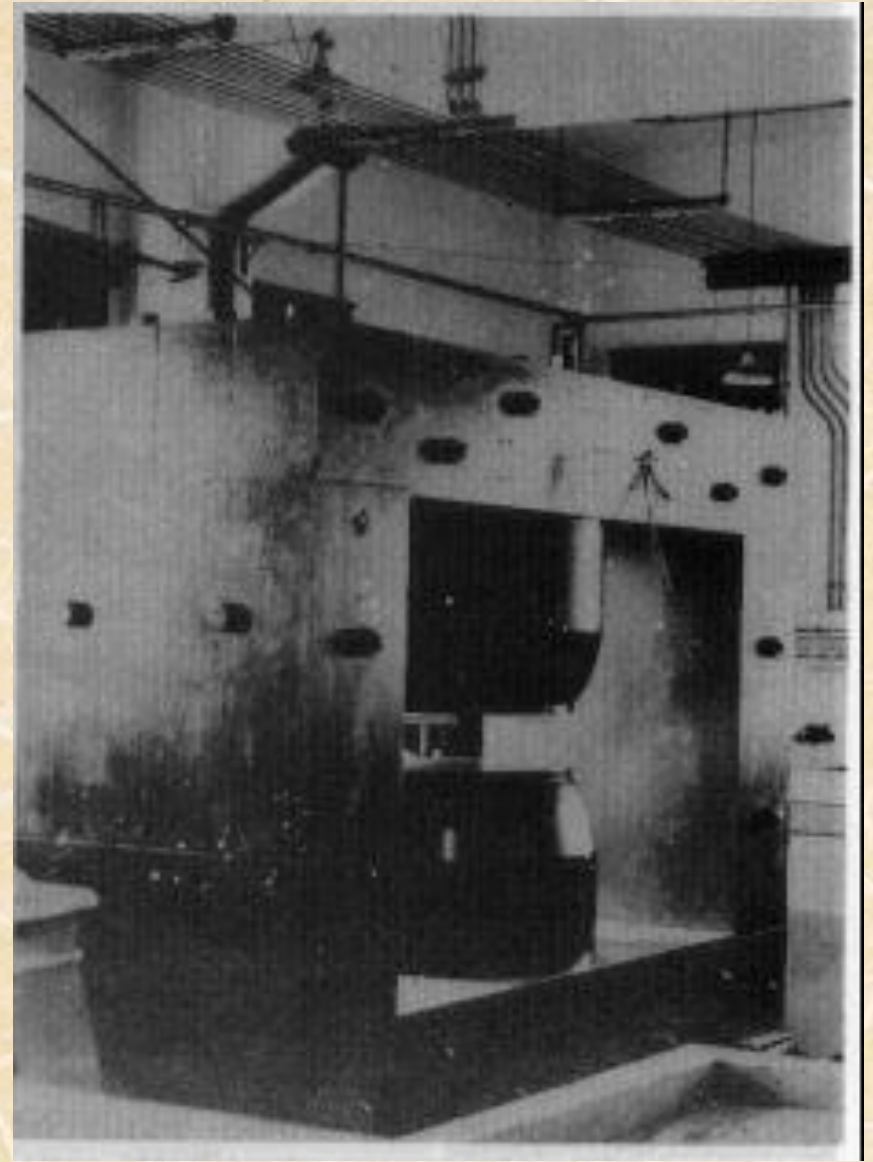
27インチサイクロトロン(1934年)
Livingston(左)とLawrence(右)



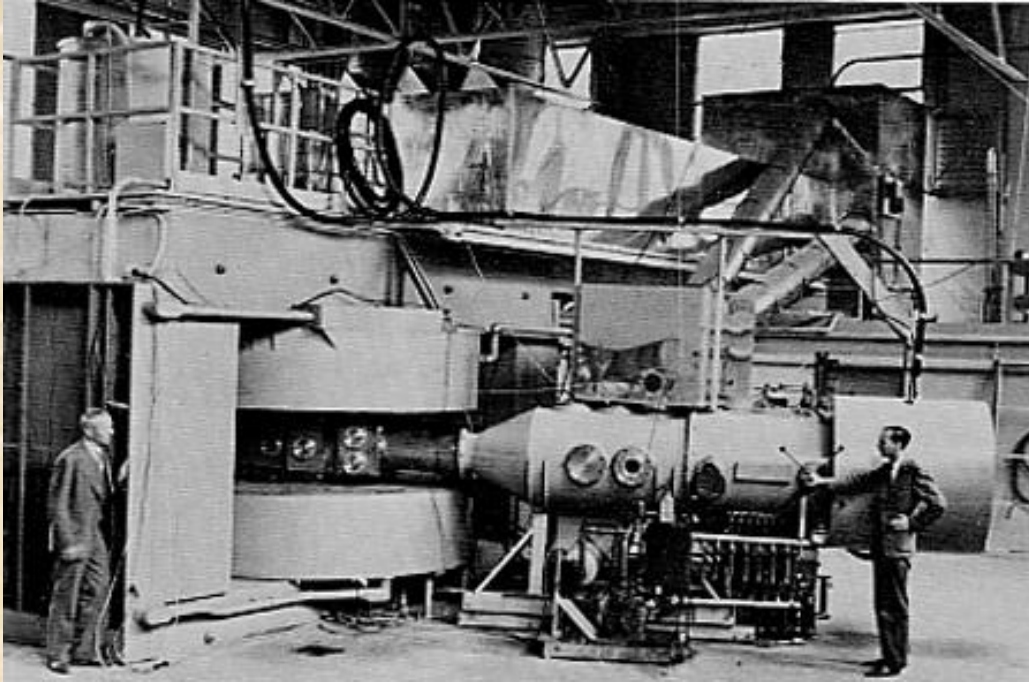
理研1号サイクロトロン(当時は小サイクロトロン
といった)(1937年)(理研websiteより)



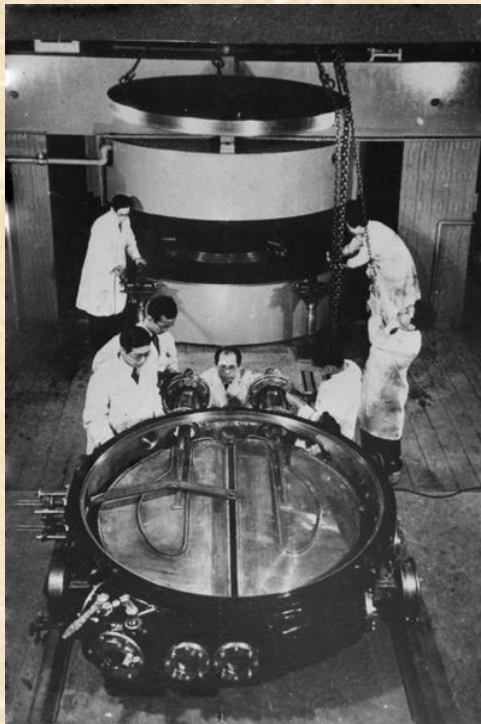
戦前の阪大のサイクロトロン



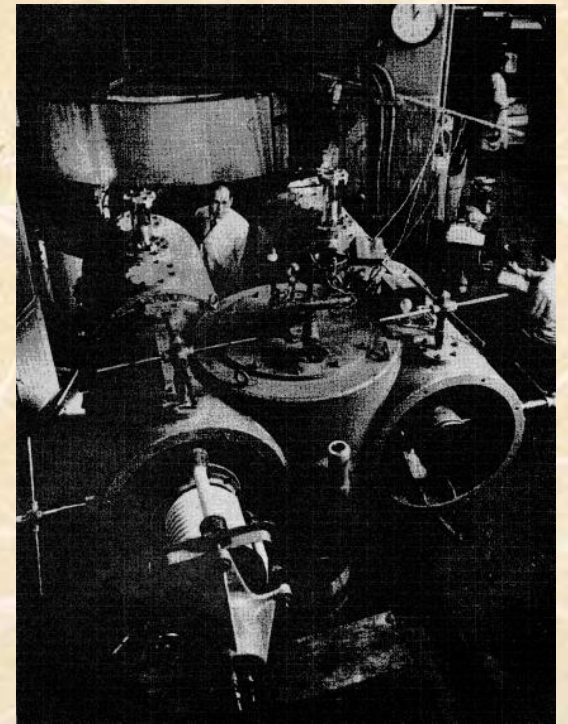
戦前の京大のサイクロトロン



バークレイ60インチ
サイクロトロン



理研大サイクロトロン
改造前(左) 改造後(右)



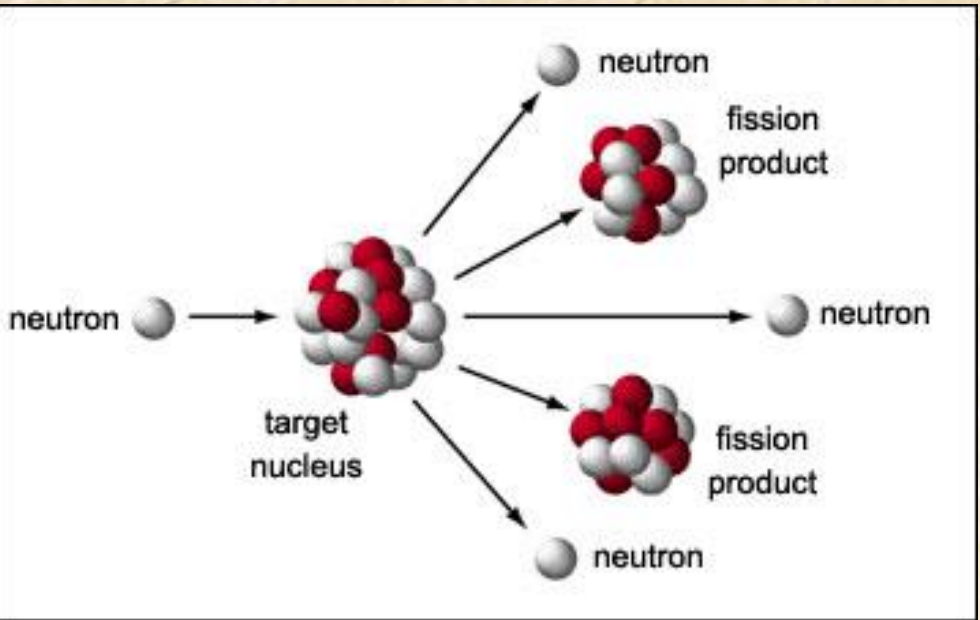
核反応 核変換 核分裂現象の発見

- 1919 Ernest Rutherford discovers the proton by artificially transmuting an element (nitrogen into oxygen).
- 1930 Ernest O. Lawrence builds the first cyclotron in Berkeley.
- 1931 Robert J. Van de Graaff develops the electrostatic generator.
- 1932 James Chadwick discovers the neutron.
- 1932 J. D. Cockroft and E. T. S. Walton first split the atom.
- 1932 Lawrence, M. Stanley Livingston, and Milton White operate the first cyclotron.
- 1934 Enrico Fermi produces fission.
- 1938 Otto Hahn and Fritz Strassmann discover the process of fission in uranium.
- 1938 Lise Meitner and Otto Frisch confirm the Hahn-Strassmann discovery and communicate their findings to Niels Bohr.

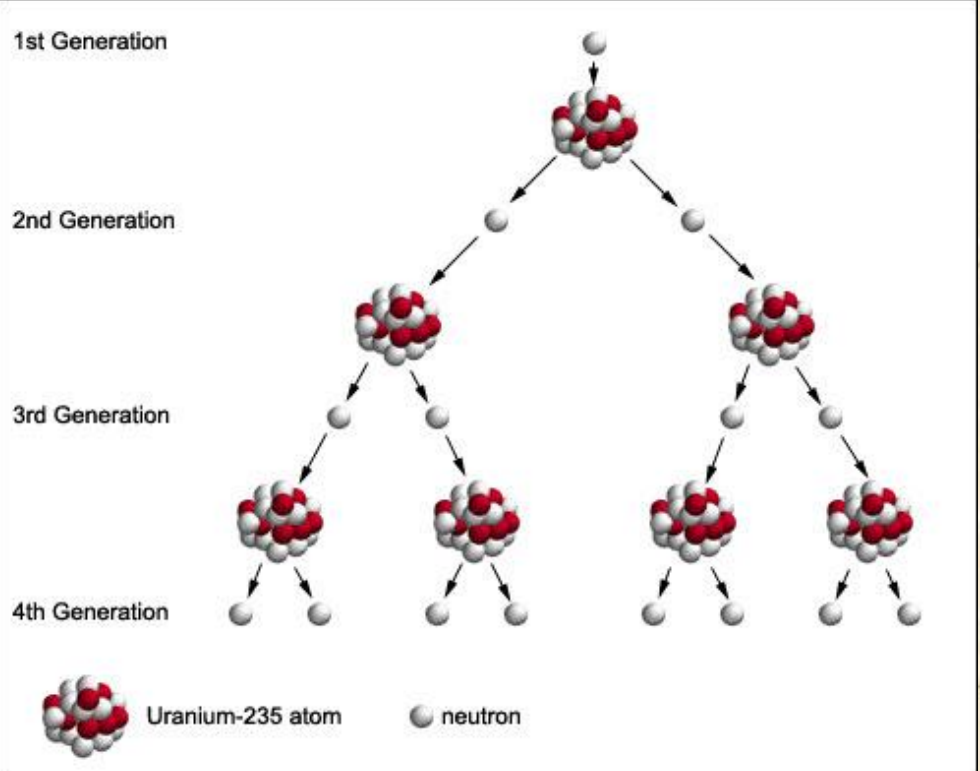
原子力の始まり



Lise Meitner Otto Hahn



Nuclear fission
核分裂



Nuclear chain reaction
連鎖反應

原子力の時代、ウラン、プルトニウム、原子爆弾

- August 2, 1939 Albert Einstein writes President Franklin D. Roosevelt.
- September 1, 1939 Germany invades Poland.
- October 21, 1939 The Uranium Committee meets for the first time.
- Spring-Summer 1940 Isotope separation methods are investigated.
- February 24, 1941 Glenn T. Seaborg's research group discovers plutonium.
- March 28, 1941 Seaborg's group demonstrates that plutonium is fissionable.
- May 3, 1941 Seaborg proves plutonium is more fissionable than uranium-235.
- June 22, 1941 Germany invades the Soviet Union.
- July 2, 1941 The British MAUD report concludes that an atomic bomb is feasible
- December 7, 1941 The Japanese attack Pearl Harbor.
- December 10, 1941 Germany and Italy declare war on the United States..

原子爆弾

オットー・ハーンによる核分裂反応の発見で世界の科学者は兵器への利用可能性を理解した。

しかし、仁科芳雄らは米国でも科学者を総動員しなければ開発は大戦中には間に合わないと考えていた。

ところが、ドイツに先を越されることをおそれたアメリカではマンハッタン計画を立て、まさに全米の科学者を総動員して原爆開発に成功した。

核燃料の製造研究の始まり

December 18, 1941 The S-1 Executive committee gives Lawrence \$400,000 to continue electromagnetic research.

May 23, 1942 The S-1 Executive Committee recommends that the project move to the pilot plant stage and build one or two piles (reactors) to produce plutonium and electromagnetic, centrifuge, and gaseous diffusion plants to produce uranium-235.

September 17, 1942 Colonel Leslie R. Groves is appointed head of the Manhattan Engineer District. He is promoted to Brigadier General six days later.

November 22, 1942 On the recommendation of Groves and Conant, the Military Policy Committee decides to skip the pilot plant stage on the plutonium, electromagnetic, and gaseous diffusion projects and go directly from the research stage to industrial-scale production. The Committee also decides not to build a centrifuge plant.

November 25, 1942 Groves selects Los Alamos, New Mexico as the bomb laboratory (codenamed Project Y). Oppenheimer is chosen laboratory director.

December 2, 1942 Scientists led by Enrico Fermi achieve the first self-sustained nuclear chain reaction in Chicago.

原子爆弾の開発

- ・核燃料製造

ウラン分離とプルトニウム増殖

Calutronと原子炉

- ・核反応データを得るための加速器

原爆の燃料

ウラン型原爆 広島

ウラン濃縮が必要

ガス拡散、

熱拡散、

遠心分離、

電磁気分離、 Calutron

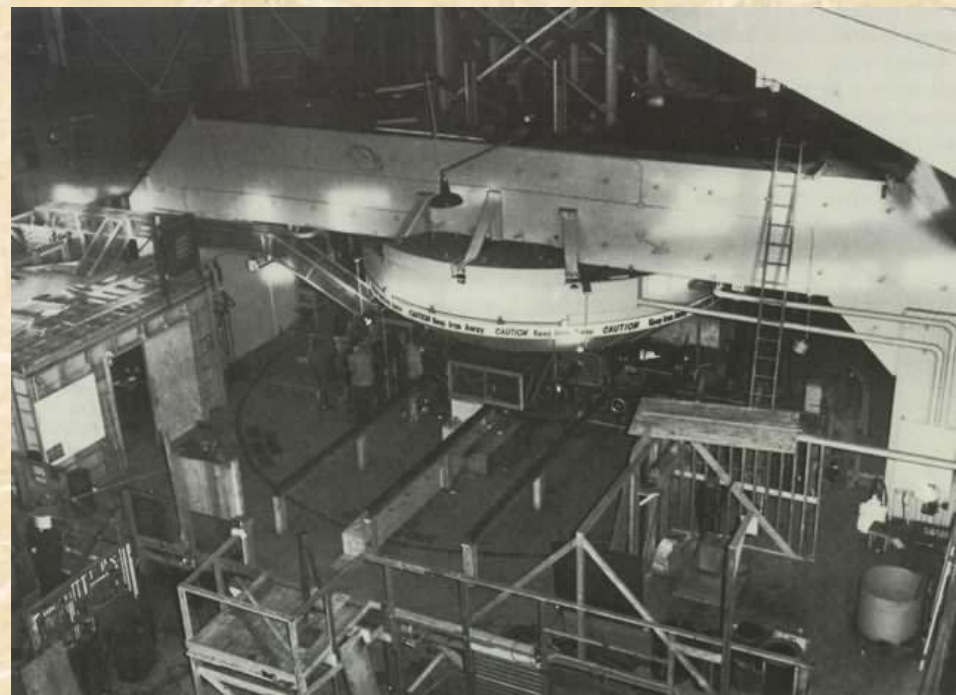
レーザー分離

プルトニウム型 長崎

原子炉でウラン238をプルトニウム239に変換する



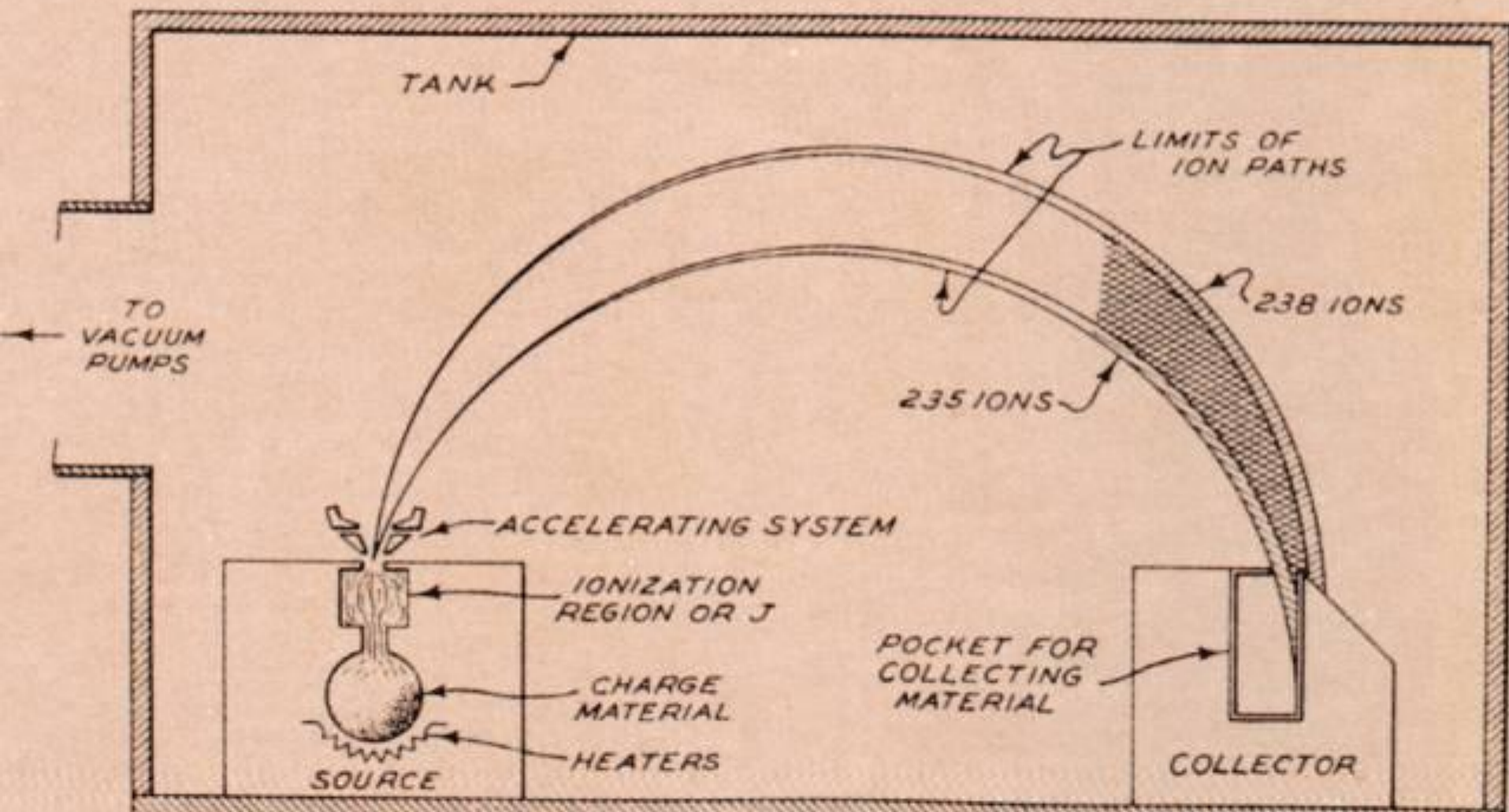
184インチサイクロトロン用電磁石



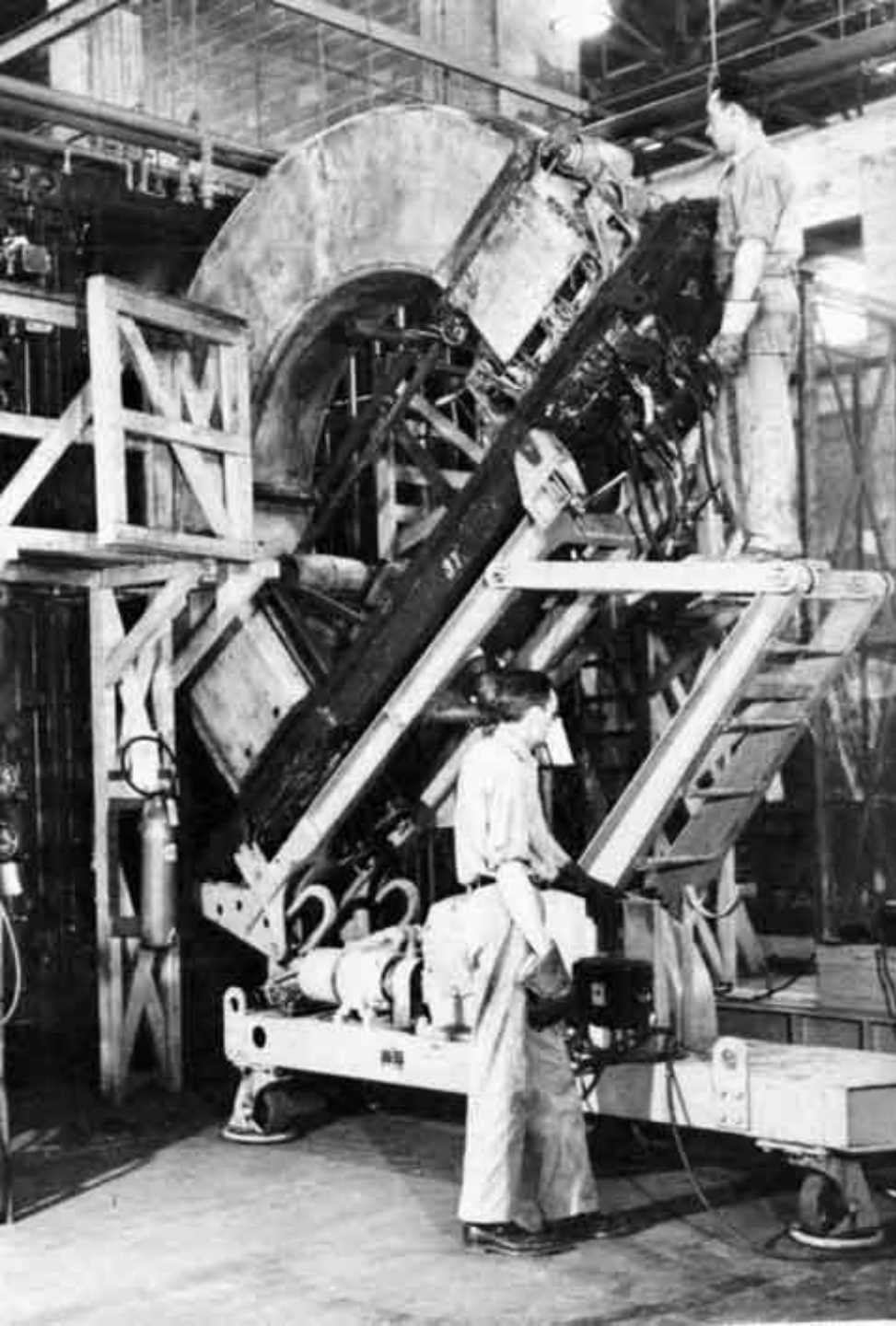
カルトロン試験用に使われているところ

ローレンスは184インチの巨大サイクロトロンを作るために電磁石を製造したが、これを急遽ウランの静電分離用の質量分析器(カルトロン)の開発のために試験用の磁石として転用することにした。

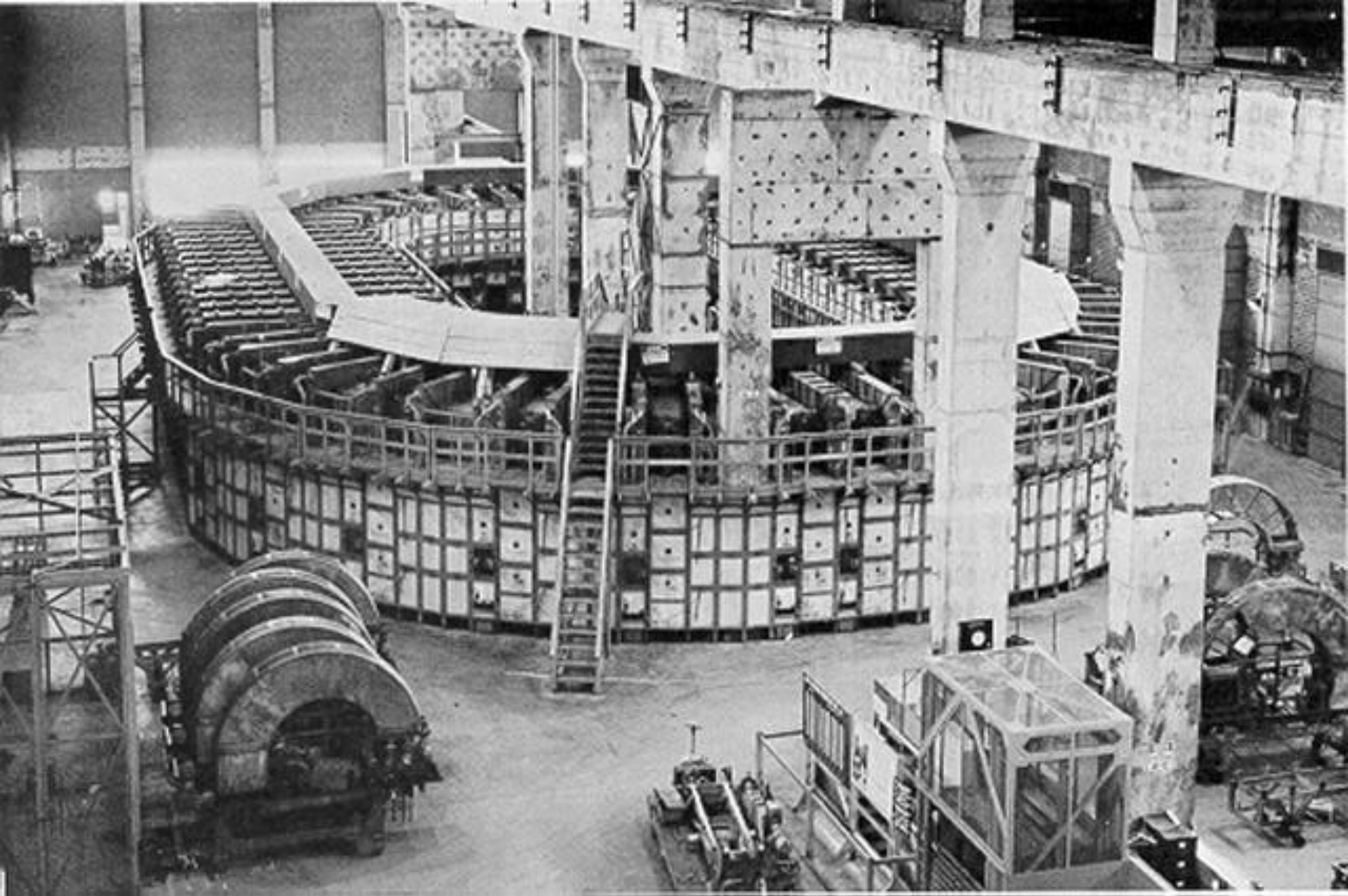
THE E M METHOD OF SEPARATING
THE COMPONENTS OF TUBALLOY



カルトロン¹の原理



アルファ・カルトロン
のタンクの一つ



アルファ・カルトロン・レーストラック

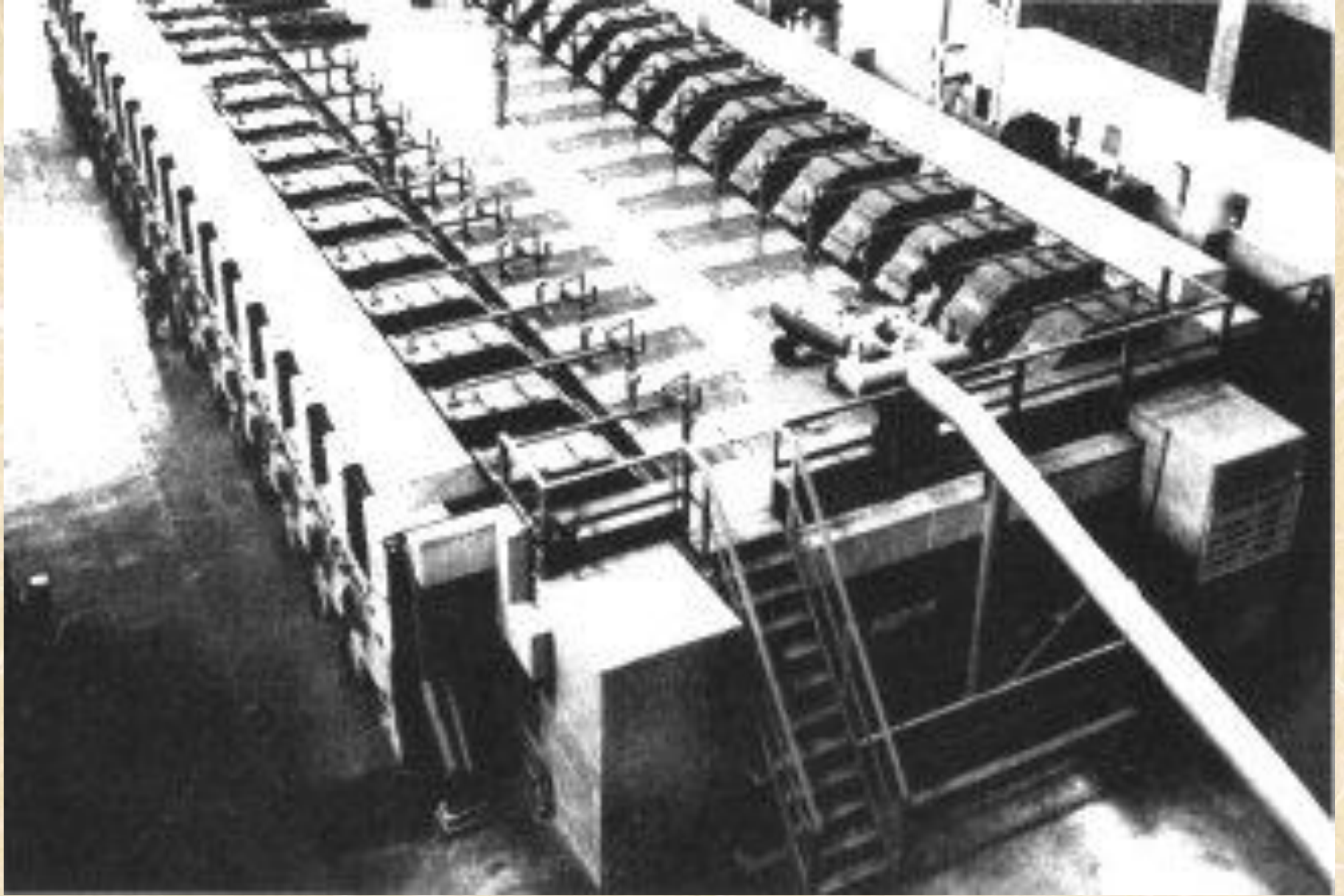
このようなレーストラックを9台作った(1レーストラックに96個のカルトロン磁石)



α Calutronのオペレータ



CalutronがあったオークリッジのY-12プラント



Y-12 ベータ・カルトロン

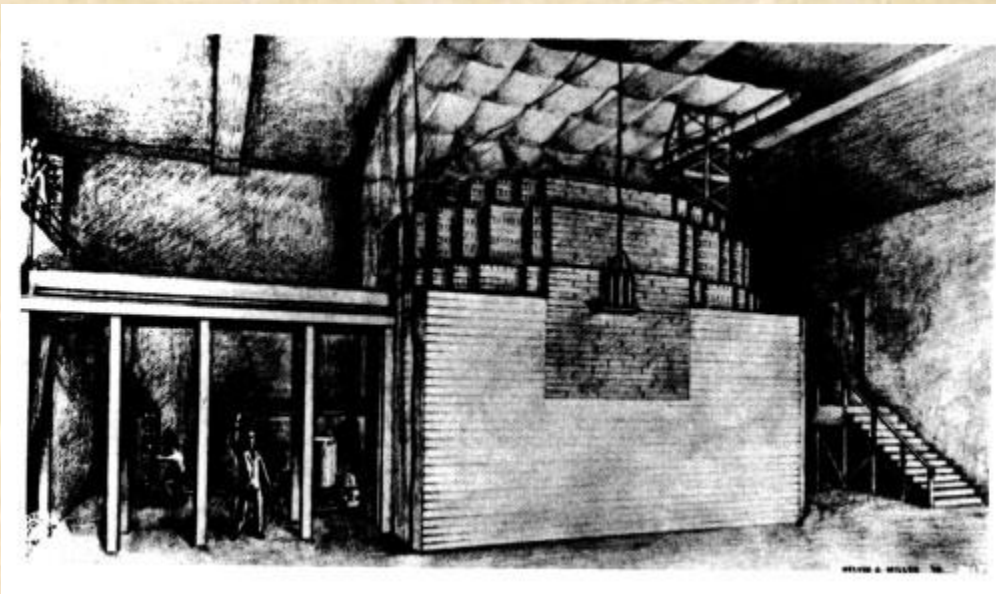
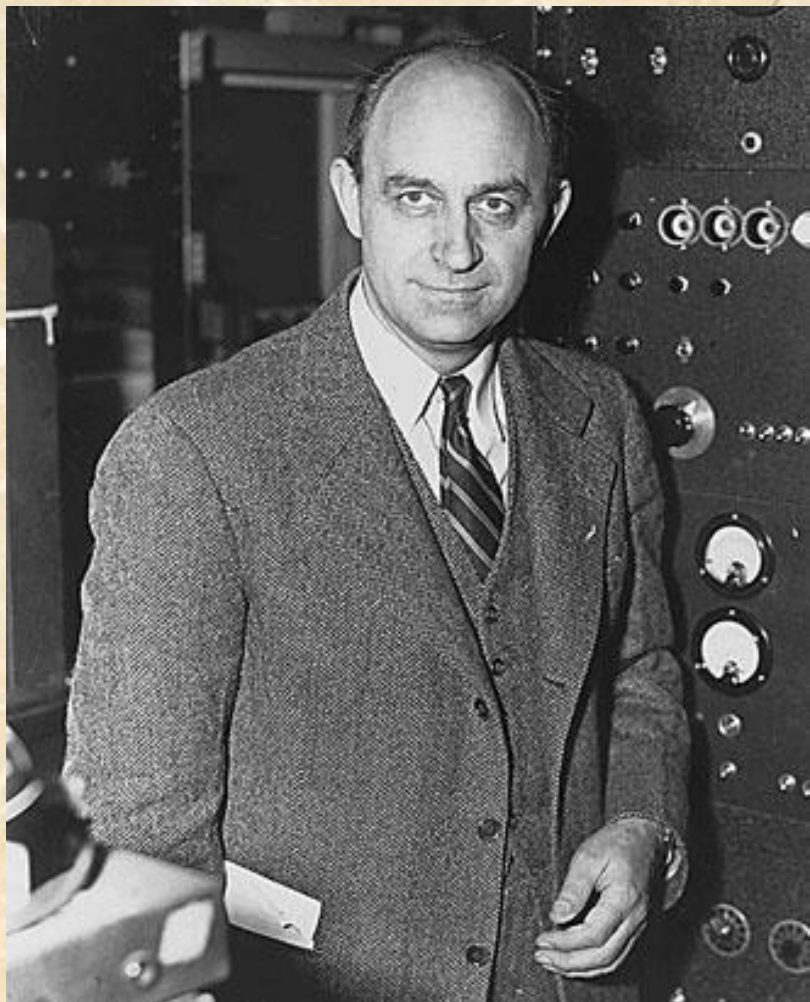
このようなレーストラックを8台作った(1レーストラックに36個のカルトロン磁石)



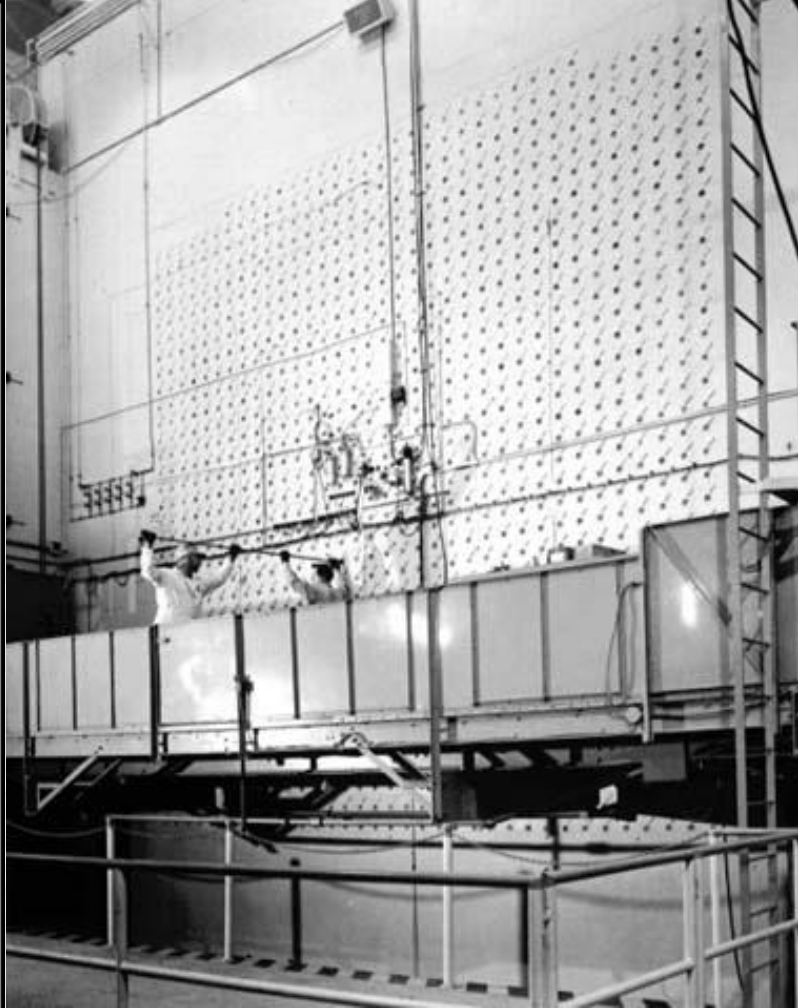
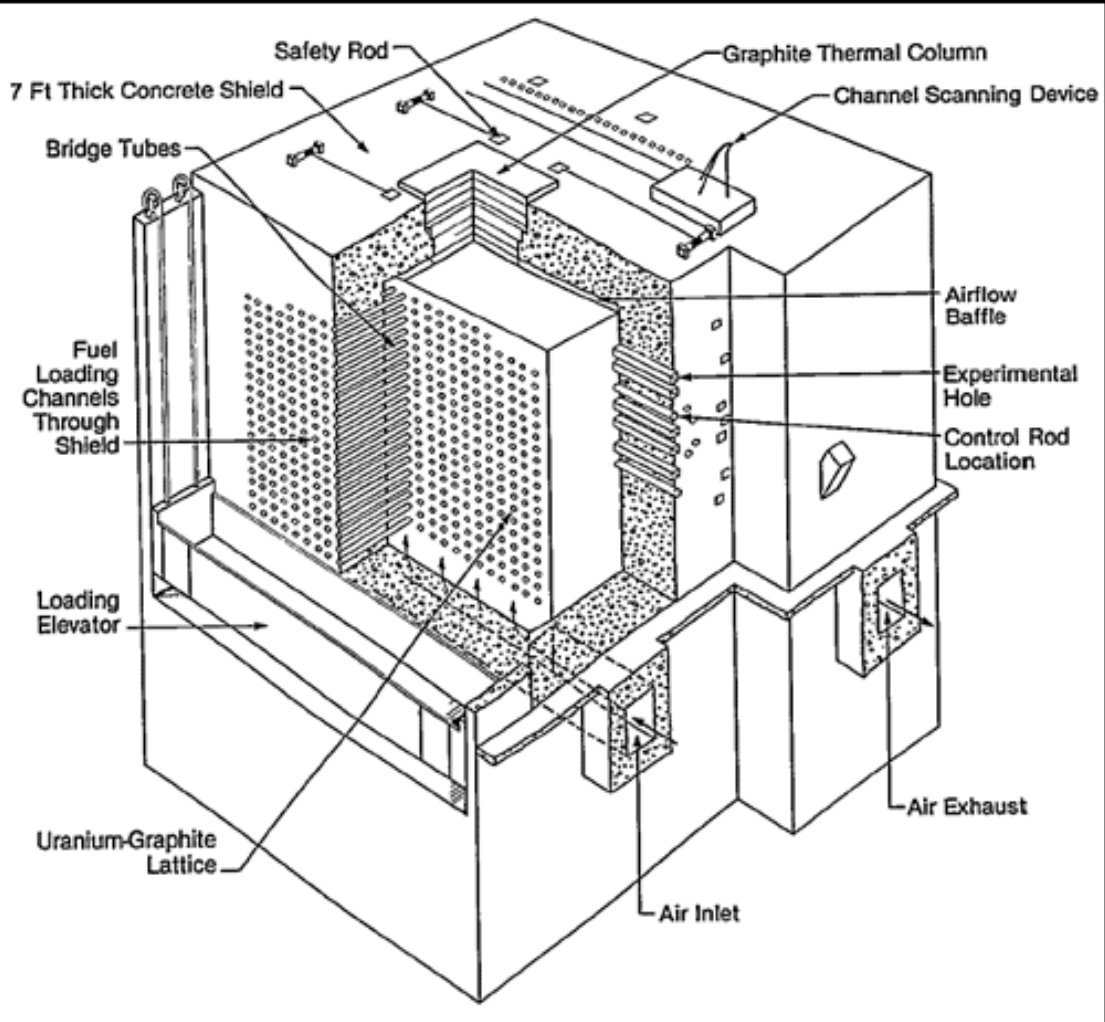
K-25

**ガス拡散法
施設**

ガス拡散法で少し濃縮し、次にアルファ・カルトロンで濃縮し、さらにベータ・カルトロンで濃縮する(1年間で50kgのウラン235を得た)



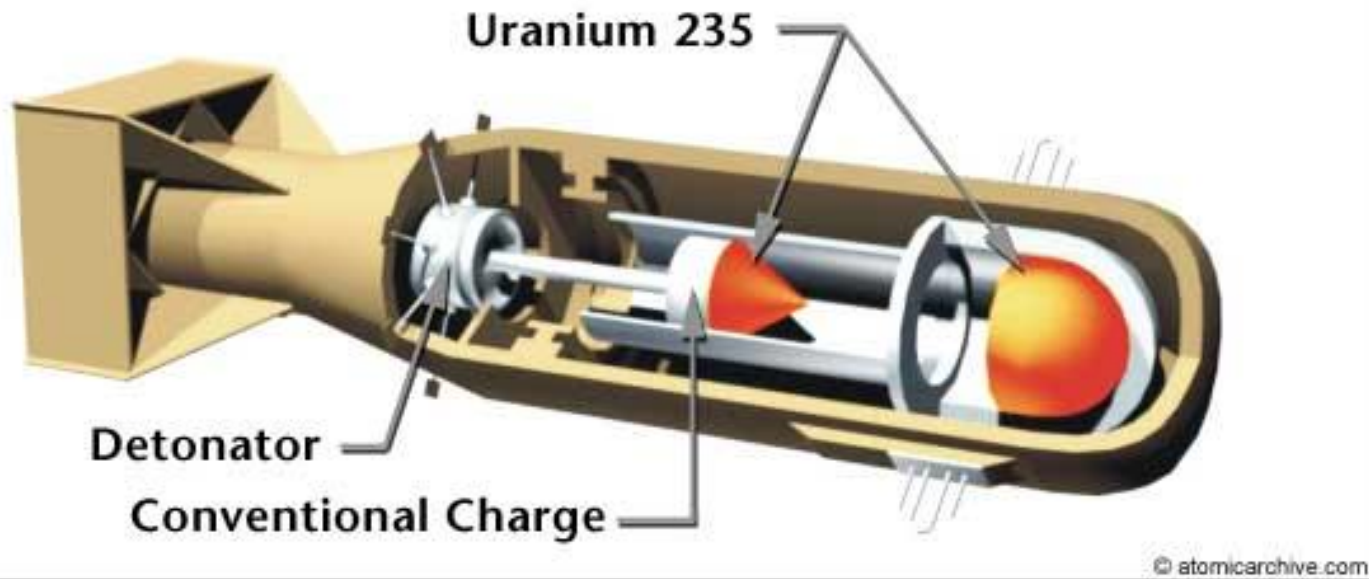
フェルミの原子炉シカゴパイル(絵)
1942年12月2日臨界実験成功



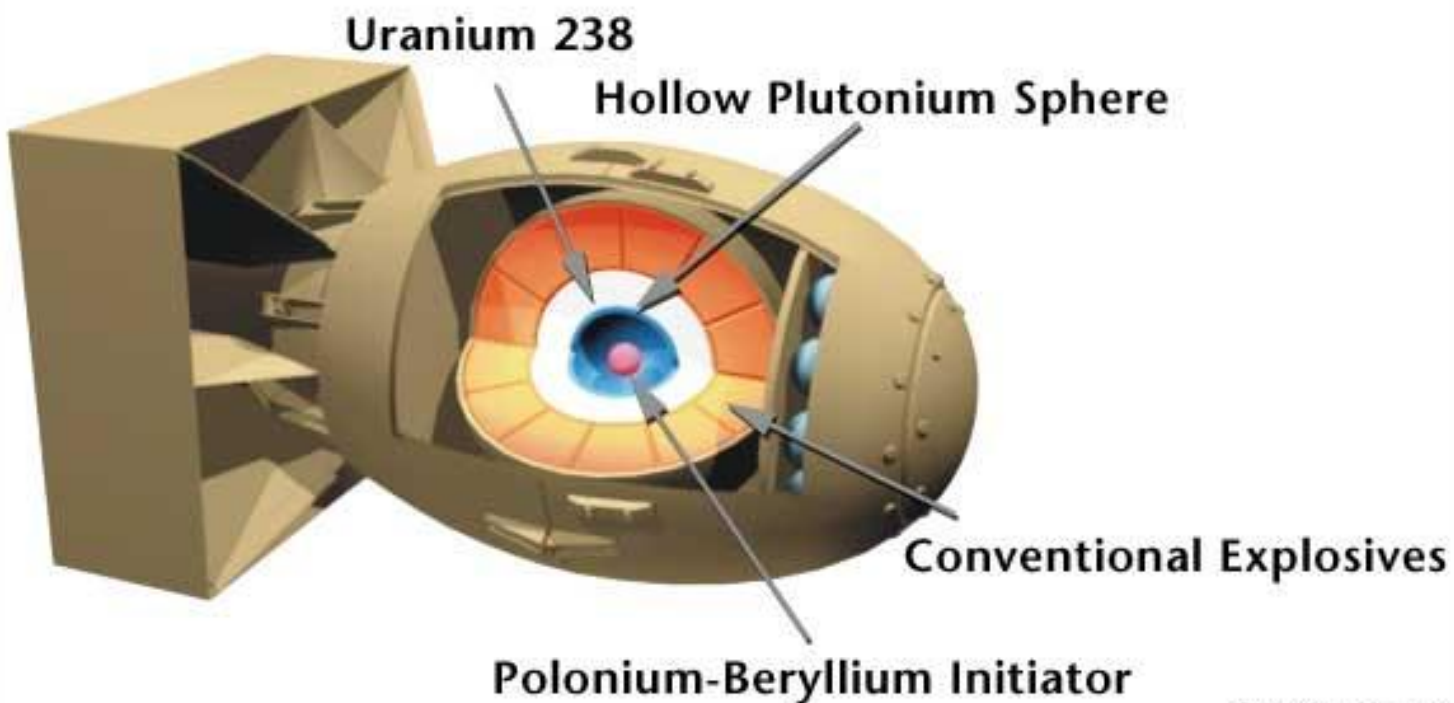
空冷パイル

概念図(左)

ウラン挿入(右)



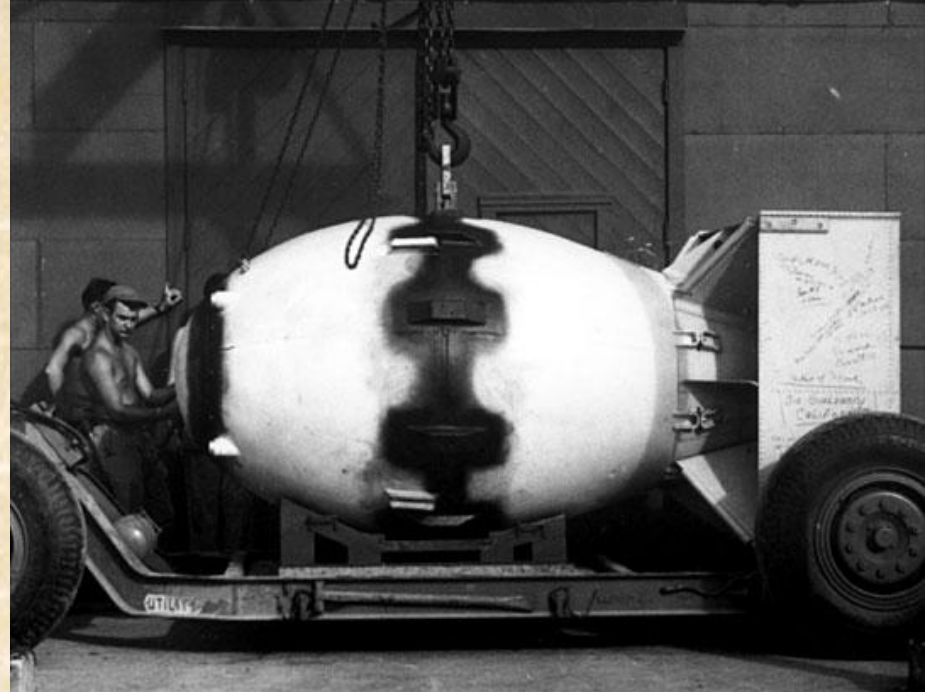
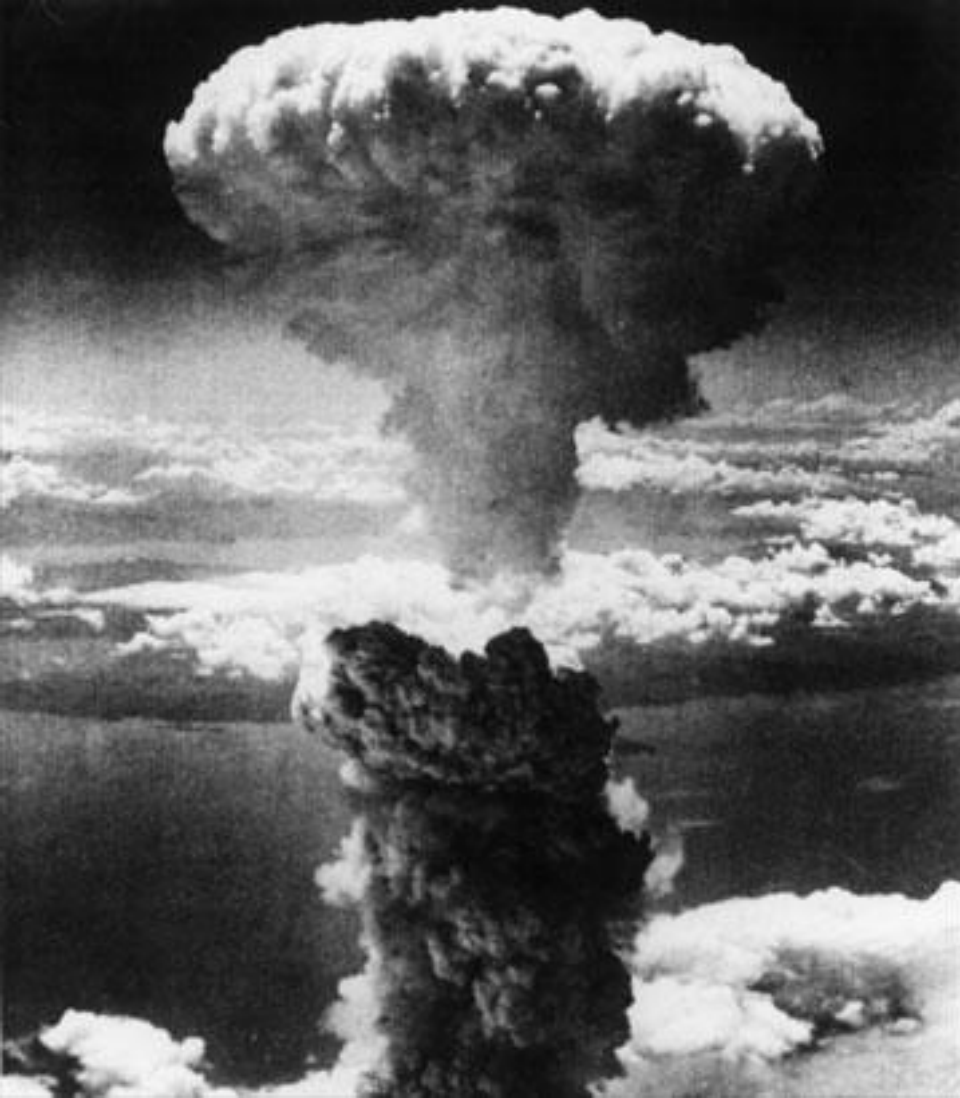
ウラン爆弾
(広島型)
Little Boy



プルトニウム
爆弾
(長崎型)
Fat Man



1945. 8. 6 広島



1945.8.9 長崎



日本の原爆研究

理研仁科 二号研究(陸軍)

熱拡散分離筒の試作研究、阪大でも軍の指導で学生が行った(理研のものは空襲で破壊され、阪大のものは戦後すぐ学生が土佐堀川に捨てた)

京大荒勝 F研究(海軍)

遠心分離法の研究(製作までに至らなかった)

京大F研究ノート

ウラニウム問題
本回会合

場所 大阪水文示工
出席者 川村定美 海軍大佐

日時 昭17年 10月

三井再男 海軍大佐 (海軍航空本部主任兼軍需
本部合金課長, 軍需省軍
需局合金課長)

黒瀬 清 海軍技術大尉 (海軍航空本部主任兼軍
需局合金課長)

岡田辰三 (京大), 荒勝又策, 湯川秀樹, 佐々木申二 (京大)

小林祐 (京大), 萩原雄馬 太郎 (化研) 千谷利三, 奥田

坂田昌一 (京大), 四井井 海軍航空本部

教授日会者トリ, 先づ 岡田辰三教授

川左

$UF_6 \rightarrow UF_4 \rightarrow Cu$
Centrifuge = 分離
Annual Report of Chemical Soc
in reaction / 可能性 = 湯川教授
進行スル 31日

金属ウラン製造法

戦時研究 F研究

昭和20年7月21日

サイクロトロンと原爆研究

- ・仁科の60インチサイクロトロンは原爆研究のための原子核反応のデータを得る研究に役立つと陸軍に対しては述べていたが、実際は資金を得てサイクロトロンを建設するための方便的であった。
- ・荒勝研究室で得た核分裂の際に発生する平均中性子数2.6個という値は当時最高の精度の実験データであったが、公表された純粋な物理研究。
- ・米国ハーバード大学のサイクロトロンは原爆開発用のデータをとるためにロスアラモスに移設されて使われた。



First Harvard Cyclotron circa 1940

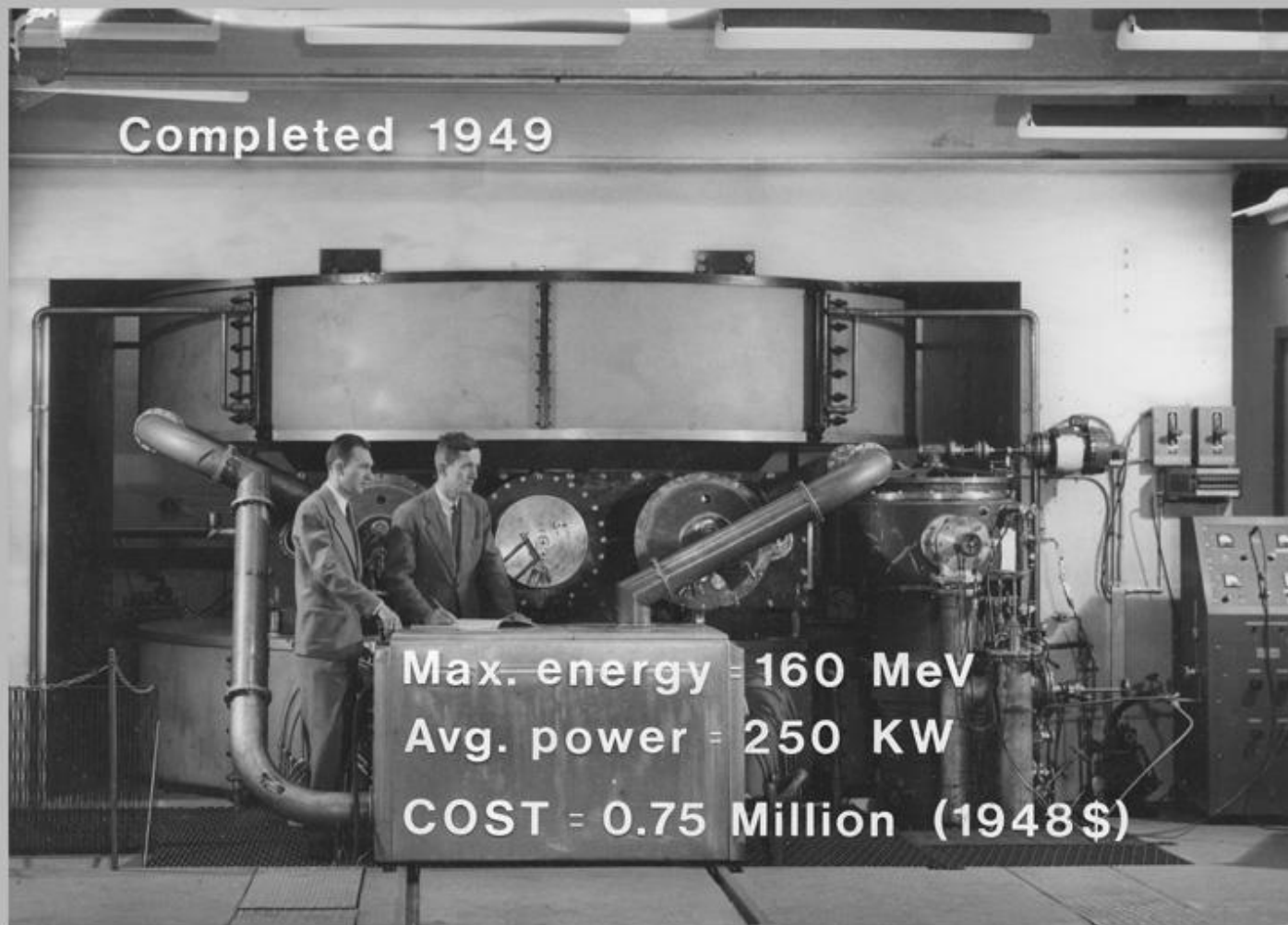
Prof. J.C. Street

Prof. K.T. Bainbridge

Dr. R.W. Hickman

戦前のハーバード大学のサイクロトロン

(ロスアラモスへ移設して原爆開発に必要なデータを得るために使われた)



(L) Dr. Lee Davenport (R) Dr. Norman Ramsey
June 10 1949

戦後のハーバード大学のサイクロトロン
(高エネルギー物理用に作られたが後に陽子線治療に使われた)



理研サイクロ トロンの占領 軍による破壊 撤去

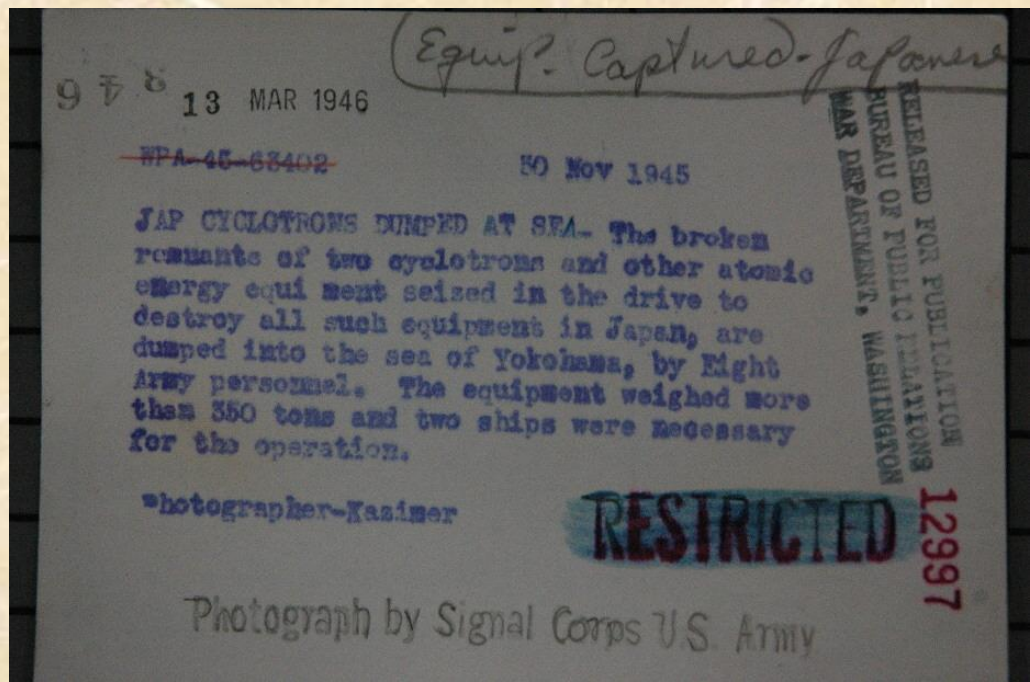
1945. 11



左: 当時写真誌
ライフに掲載さ
れたもの

右: 米軍の写真
(米国立公文
書館)

1945. 11. 30
横浜沖



978 13 MAR 1946

~~WPA-45-68402~~

30 Nov 1945

JAP CYCLOTRONS DUMPED AT SEA. The broken remnants of two cyclotrons and other atomic energy equipment seized in the drive to destroy all such equipment in Japan, are dumped into the sea of Yokohama, by Eight Army personnel. The equipment weighed more than 350 tons and two ships were necessary for the operation.

photographer-Kasimer

RESTRICTED

12997

Photograph by Signal Corps U.S. Army

RELEASED FOR PUBLICATION
BUREAU OF PUBLIC RELATIONS
WAR DEPARTMENT, WASHINGTON



Reproduced at the National Archives



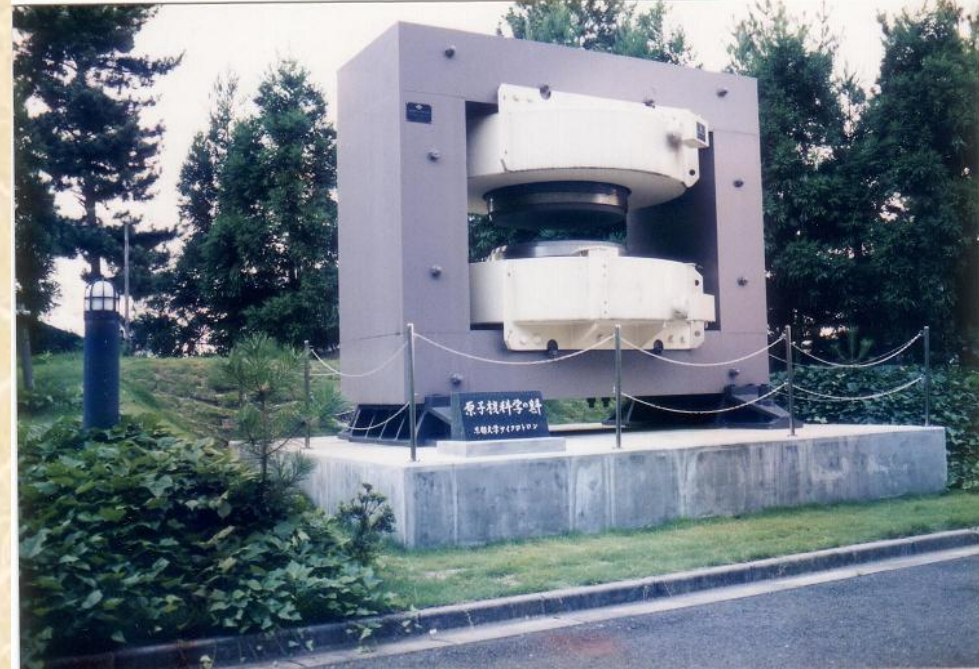
上: 阪大サイクロトン破壊撤去(1945.11.24)
(米国立公文書館所蔵)
下: 京大サイクロトン破壊撤去(1945.11.24)



Reproduced at the National Archives



京大サイクロトロン^①の遺品



2008年3月26日の京都試写会のために総合博物館入り口に運びあげられたポールチップを囲む京大関係者（右から、博物館に受け入れた大野照文、それまで保管していた荻野晃也、制作・上映企画者の塩瀬隆之各氏）

(<http://www.csij.org/03/shiminkouza.html> 市民研ウェブサイトより)

京大の戦後の復興サイクロトロン^②の磁石。ベースは残された戦前のサイクロトロンのベースを使った。（京都大学宇治キャンパスに移転展示されている）



占領軍によるドイツの原子炉(運転に至ってなかった)の解体

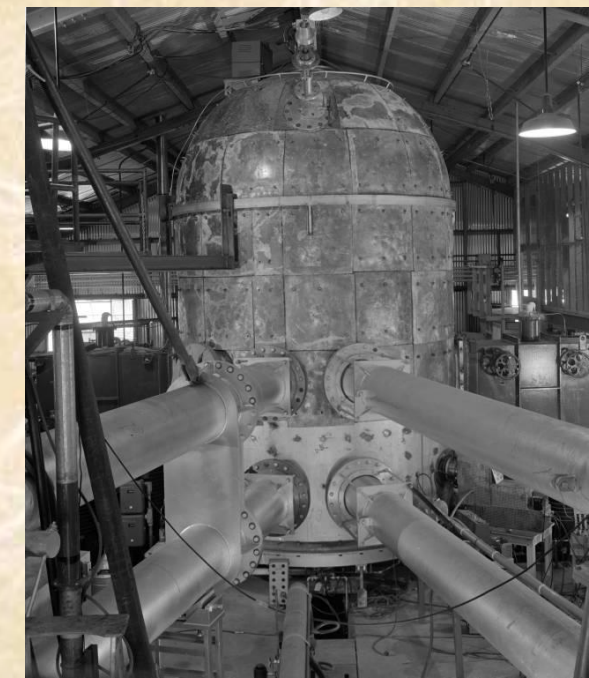
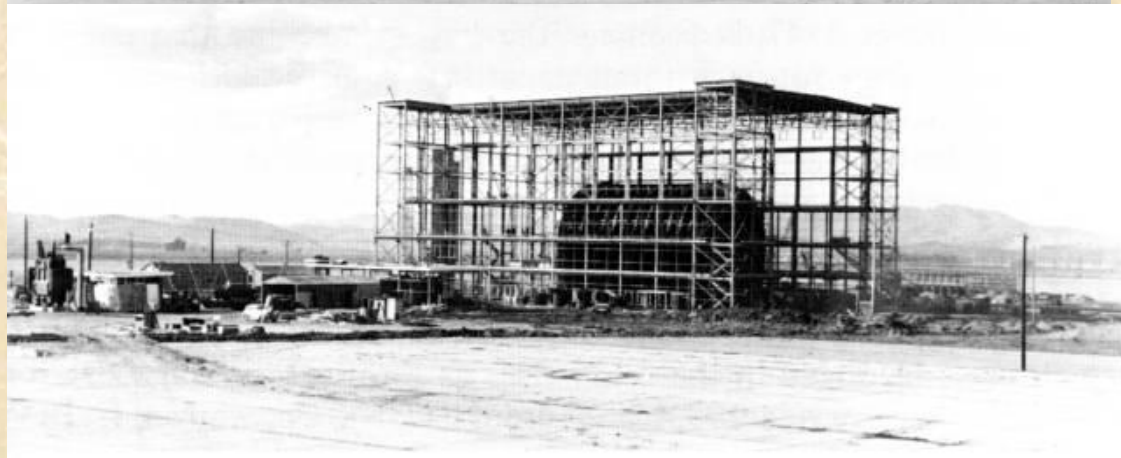
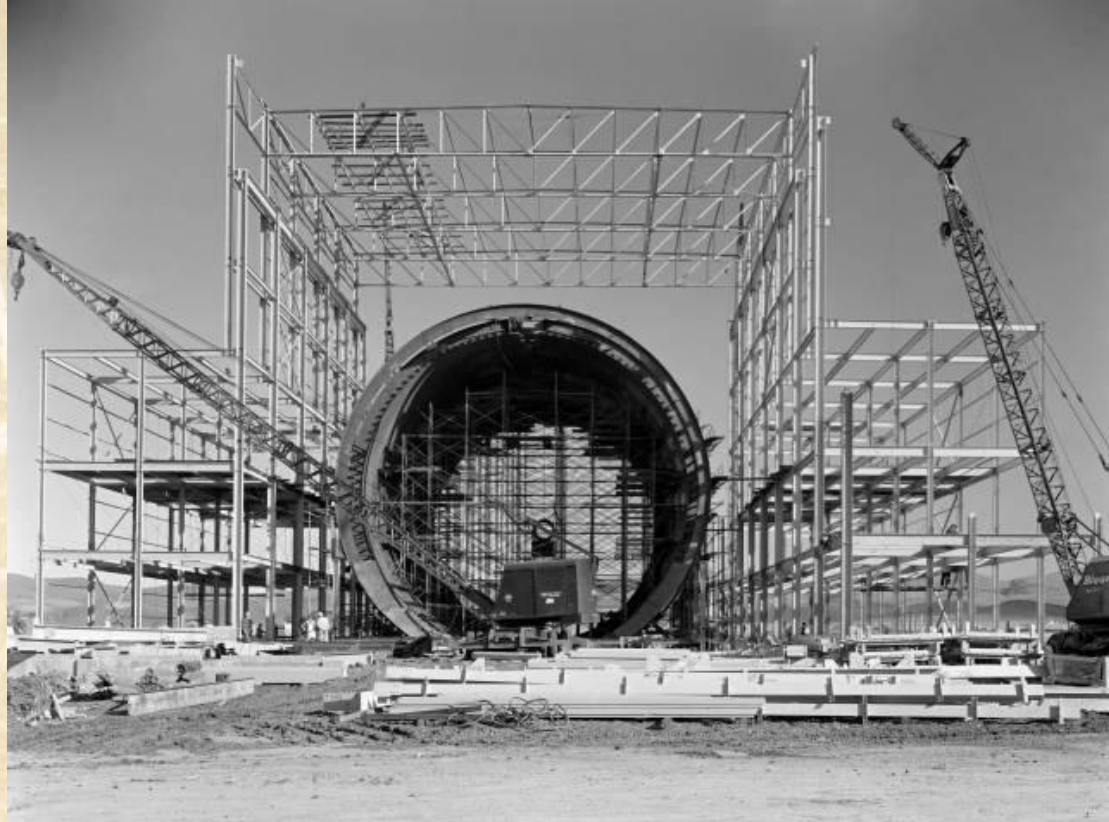
戦後の燃料製造用加速器MTAリニアック



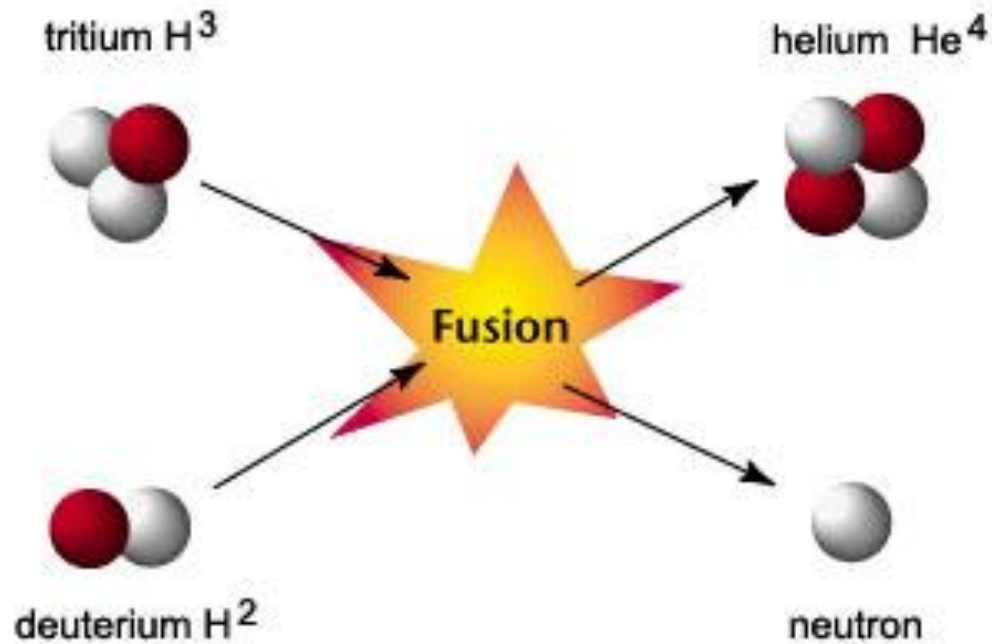
MTA mark I

(25MeV deuteron linac 直径18m 長さ18m)

Materials Testing Accelerator (MTA), was found at the Livermore Auxiliary Naval Air Station



建設中のMTA

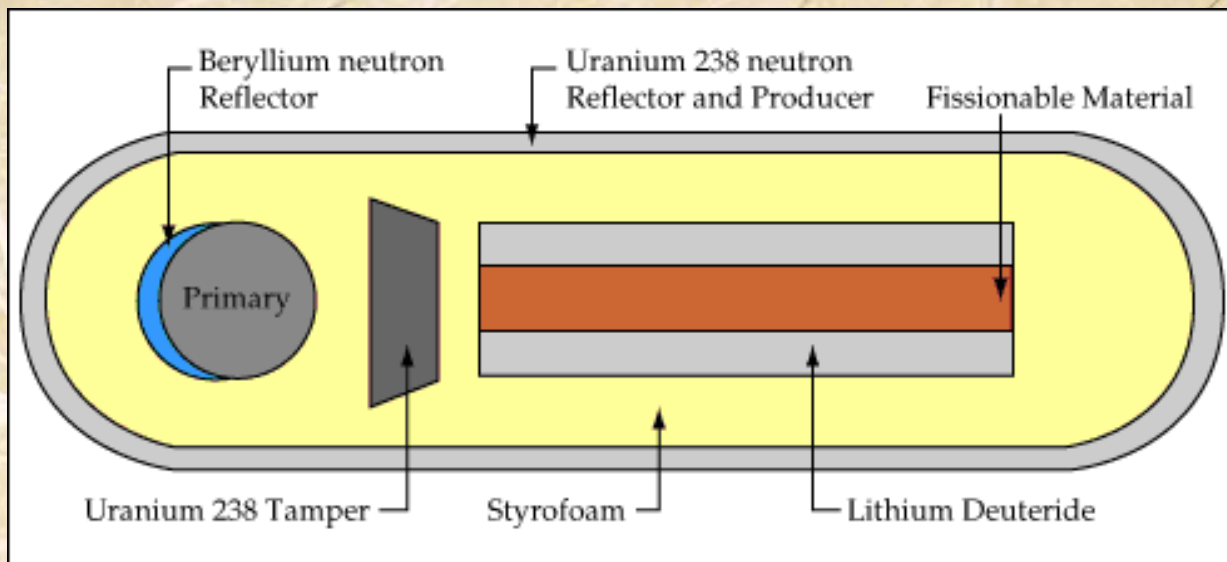


核融合反応



The production of tritium from lithium deuteride.

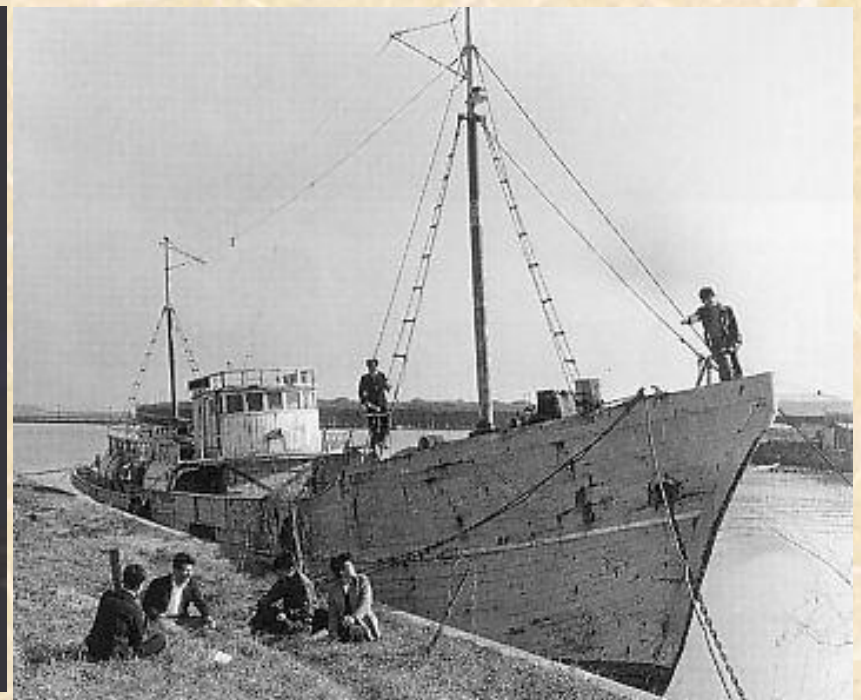
トリチウム製造反応



水素爆弾原理図



1954.3.1



第五福竜丸の被爆

日本の戦後の原子核研究

- 1945年サイクロトロンが破壊され、その後しばらく原子核の研究は禁止される
- 1951年ローレンスが来日し基礎研究再開をGHQに進言
- 理研、阪大、京大のサイクロトロン復興
- 東大(田無)に全国共同利用の研究所として原子核研究所(核研)ができる(初代所長は菊池正士)大型サイクロトロン建設。

これらはfundamental scienceのための装置で、いわゆる原子力(核エネルギー利用)のための装置ではなかった。



湯川秀樹

朝永振一郎

坂田昌一

純粋な学術研究にも兵器を含めた応用研究にも関心を持った世代

戦後日本の原子力研究開始

Atoms for Peace

- 1953年12月8日アイゼンハワー米国大統領が国連総会でAtoms for Peace という演説を行った
- 我が国では学者たちの意見がまとまらない中で議員立法により原子力予算が認められた
- それを追って原子力基本法が成立し、科学技術庁が設置された。

原子力基本法

平和目的に利用する

(原子力3原則)

民主

自主

公開

基礎と応用

Fundamental Science (基礎学術研究)

大学理学部系

Basic Research

(応用を念頭においた基礎研究)

大学工学部、原子力機構など

Development

(開発研究)

経産省NEDOなど

Industry

(商品開発・実用現場研究)

民間企業、病院など

仕分けと物差し

Fundamental Science (基礎学術研究)

トップをさらに伸ばす、国際的に尊敬される国になることに役立つ

Basic Research (応用を念頭においた基礎研究)

役に立つことを示す、経済性までは問わない、様々な試みを認める

Development (開発研究)

選択と集中、経済性を含め実用化まで

Industry (商品開発・実用現場研究)

基本的には国費で行うものではない

原子力分野の研究開発の分担連携

学術研究・知的好奇心

利用可能性の研究開発

実用・採算・可能性の研究開発

実用・大量生産

(基礎)

(応用)

Fundamental science

Basic research

Development

Industry

核融合

LHD

JT60

ITER

IFMIF

FBR

常陽

もんじゅ

実証炉

核変換・安全

FCA+

複合システム

実証炉

中性子利用

KART

(KUR-M)

JMTR

J-PARC

JRR3

連携ネットワーク

大学

核融合研

文科省関係独法研究所

経産省関係研究所

民間企業等

京大炉等

KEK等

JAEA・理研・Spring-8 放医研等

産総研等



欧州原子核研究所(CERN)

右端にジュネーブ空港の滑走路



高エネルギー加速器研究機構(KEK)



大型放射光Spring-8(播磨学園都市)



J-PARC



放射線治療用電子線形加速器リニアック

原子力の利用

原子力という言葉はやや曖昧、本来は核エネルギー
(中国では**原子能**という)

日本では ○エネルギーとしての利用
○放射線の利用

(実は、世界では**核兵器**という利用が大きい)

エネルギー利用

当初の国の方針

原子炉建設 原子力研究所を中心に建設する (大学用には関西にまず1基—京大原子炉、これは実際には放射線(中性子)利用の面が強い)

将来はプルトニウム利用へ進む

実際には発電炉は米国の軽水炉を輸入する路線になった
(科学技術庁と通産省の二重行政となる)

プルトニウム利用に関しては「常陽」を作り、さらに「もんじゅ」を作った

さらに将来は核融合炉を開発建設する

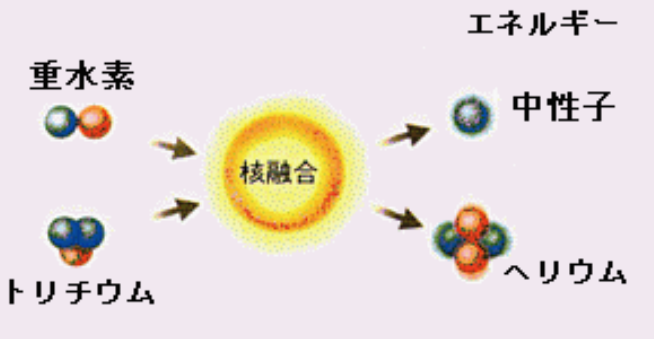
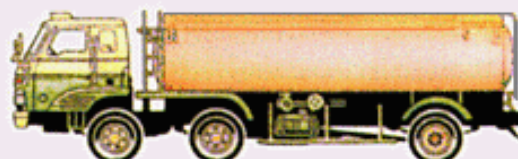
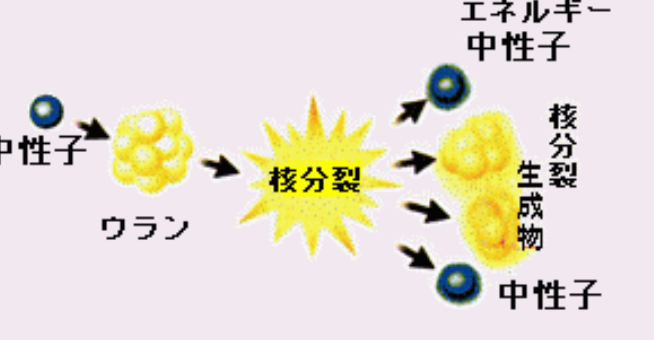
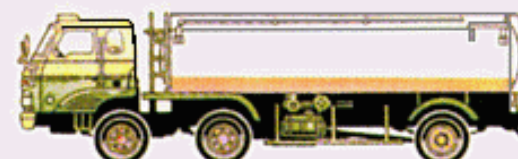
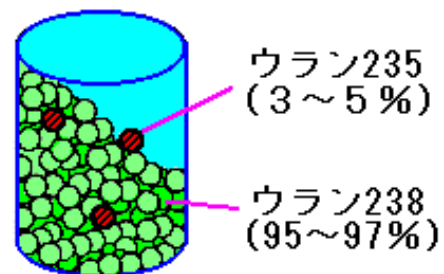
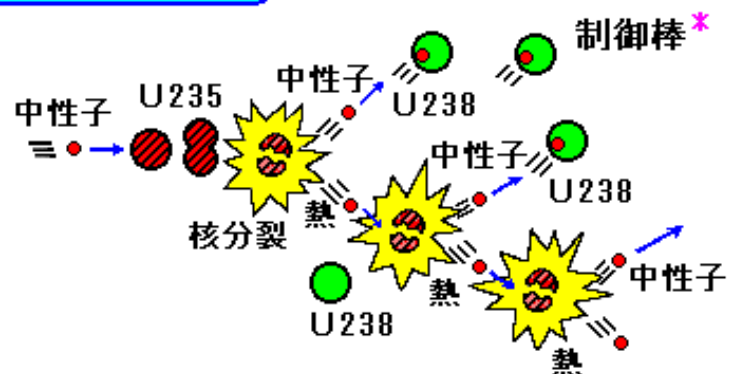
核融合	 <p>重水素 トリチウム</p> <p>核融合</p> <p>エネルギー 中性子 ヘリウム</p>	<p>重水素-トリチウム燃料1g ≒ 石油8t (タンクローリー1台分)</p> 
核分裂	 <p>中性子 ウラン</p> <p>核分裂</p> <p>エネルギー 中性子 核分裂生成物 中性子</p>	<p>ウラン(235)1g ≒ 石油1.8 t (タンクローリー1/4台分)</p> 

図2 核融合の原理と発生エネルギー量
(燃料：重水素とトリチウム)

[出典] 茨城県企画部計画調整課：ITER-ITER計画の実現に向けて (パンフ) , p.2

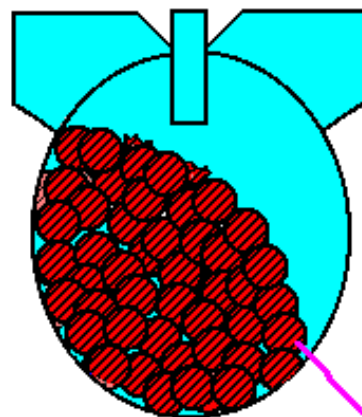
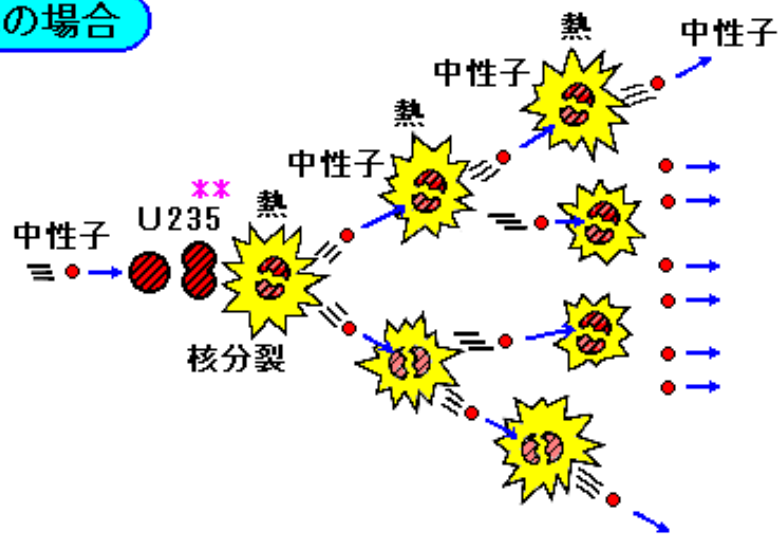
原子力発電の場合



【核燃料】

* 制御棒 (ボロン、カドミウムなど) は中子線を吸収し核分裂連鎖反応を制御する。

原爆の場合



【ウラン原爆】*

**プルトニウム原爆の場合はウラン235の替わりにほとんどプルトニウム239で構成される。

図4 原子力発電と原爆の原理の違い

【出典】電気事業連合会：原子力図面集－1998年版－、1998年10月、p80を修正

**米国スリーマイル島、ソ連チェルノブ
イルの事故**

宇宙兵器SDI

核軍縮 レーガン・ゴルバチョフ

**日本原発トラブル、事故隠し、JCO臨
界事故**

オバマ平和賞、CO2

放射線の利用

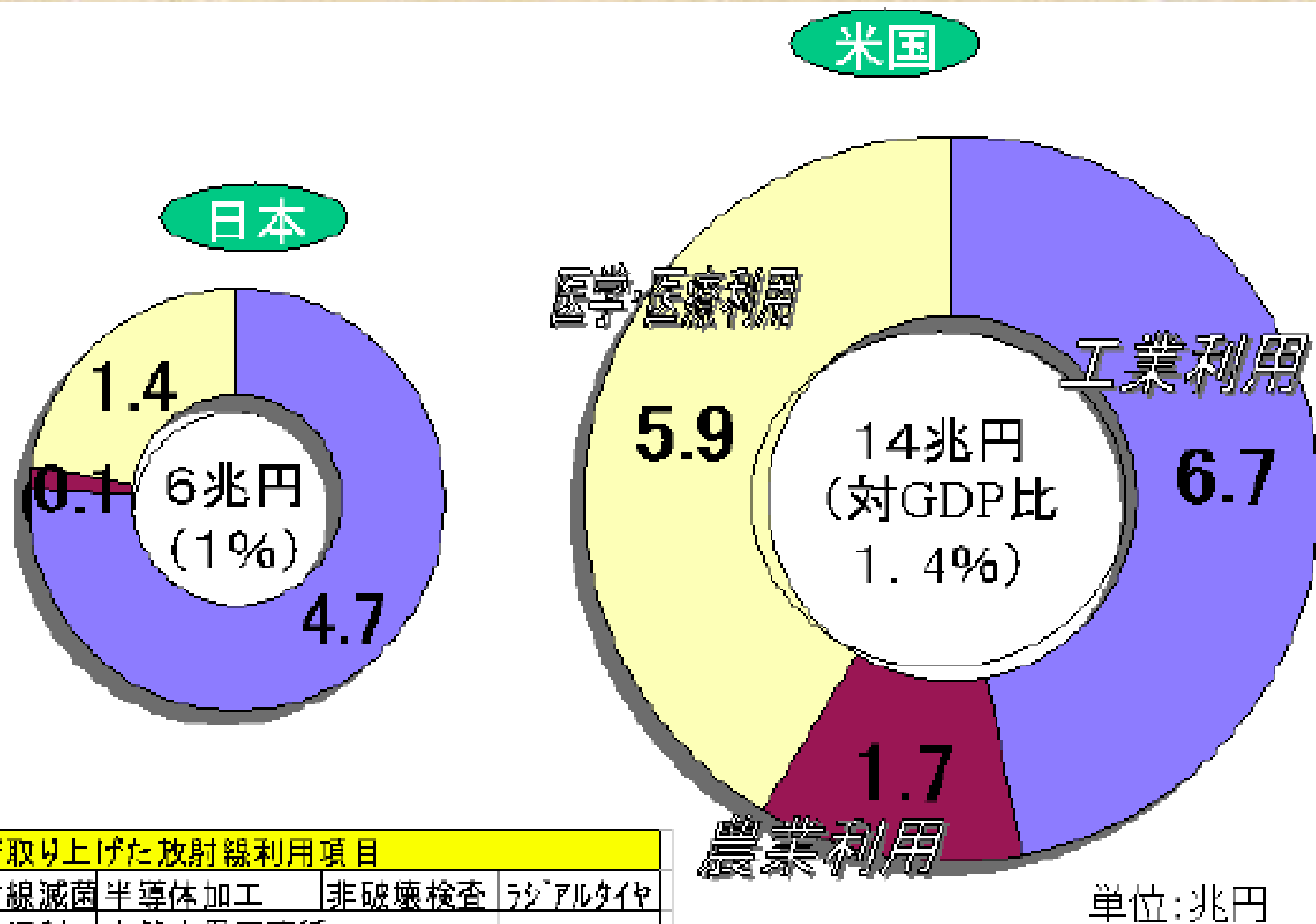
放射性同位元素

粒子加速器

研究用原子炉

このうち原子炉は原子力規制法、放射性同位元素と加速器は放射線障害防止法で規制される



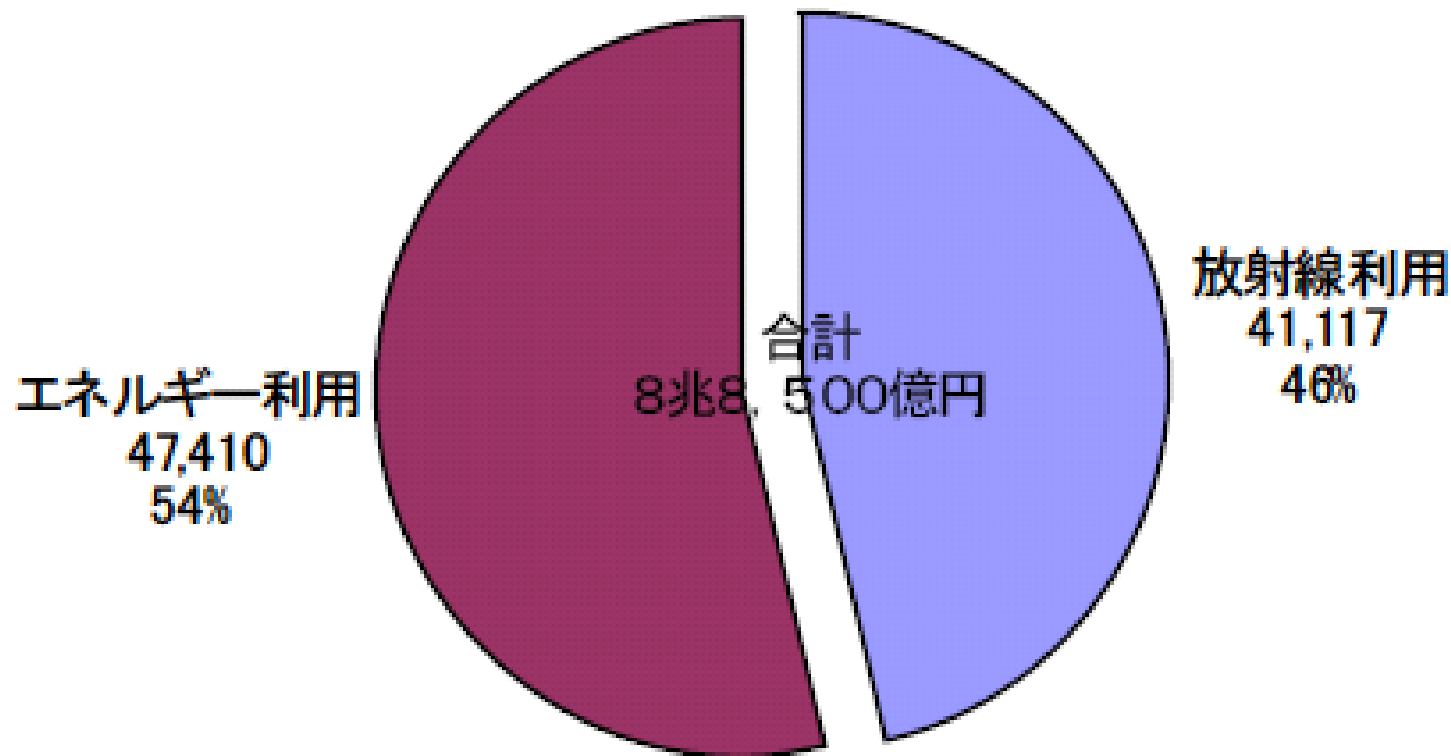


日米比較で取り上げた放射線利用項目				
工業	放射線滅菌	半導体加工	非破壊検査	ラジアルタイヤ
農業	食品照射	突然変異医育種		
医療	画像診断	前立腺がん	FDGPET	医療機器
	PI	放射性医薬品	造影剤	

図10 放射線利用の経済規模日米比較(1997年)

[資料提供] 日本原子力研究所 高崎研究所

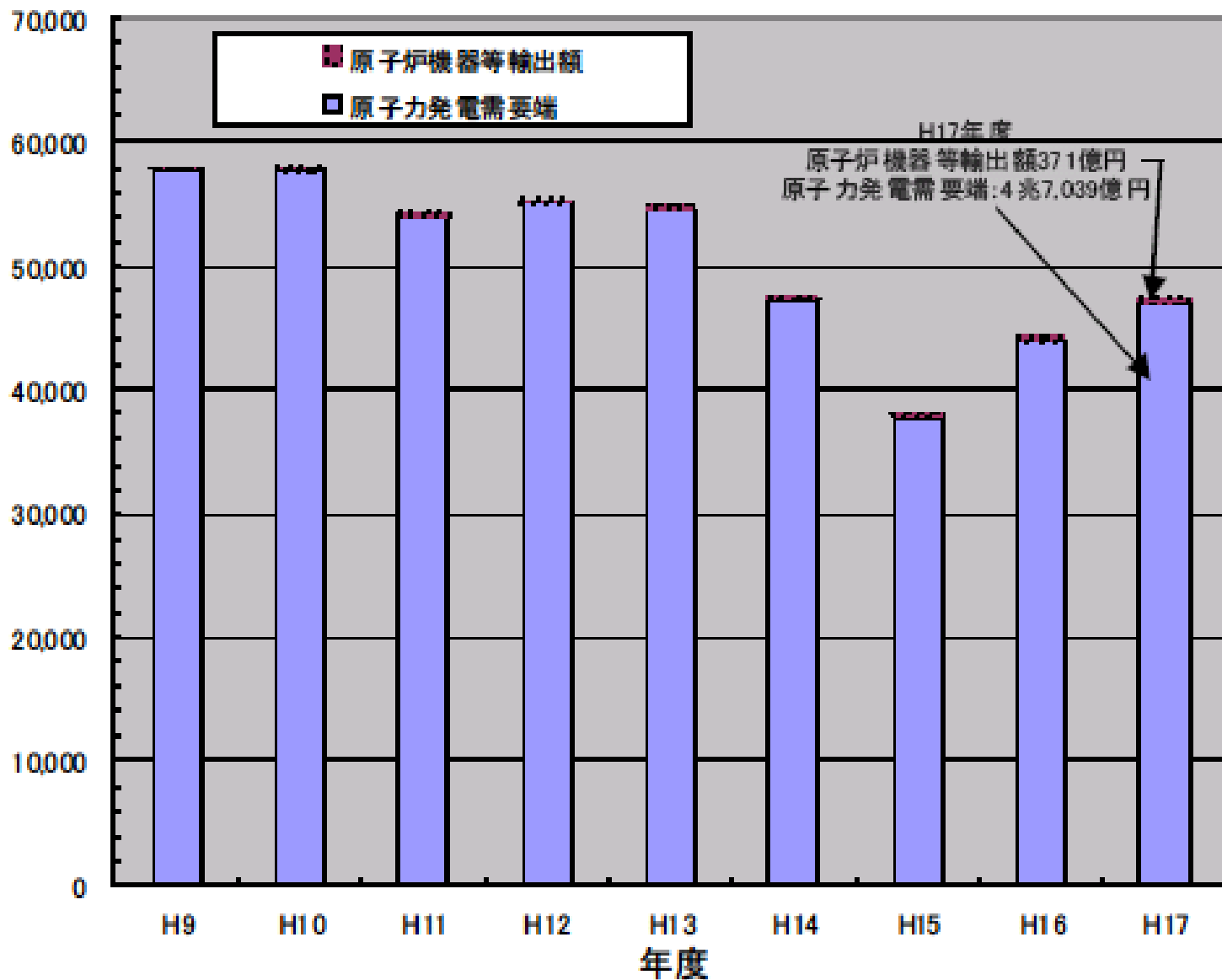
放射線利用(工業+農業+医学医療)と原子力エネルギー利用(電力需要端+機器輸出)



平成17年度 原子力利用経済規模 単位:億円

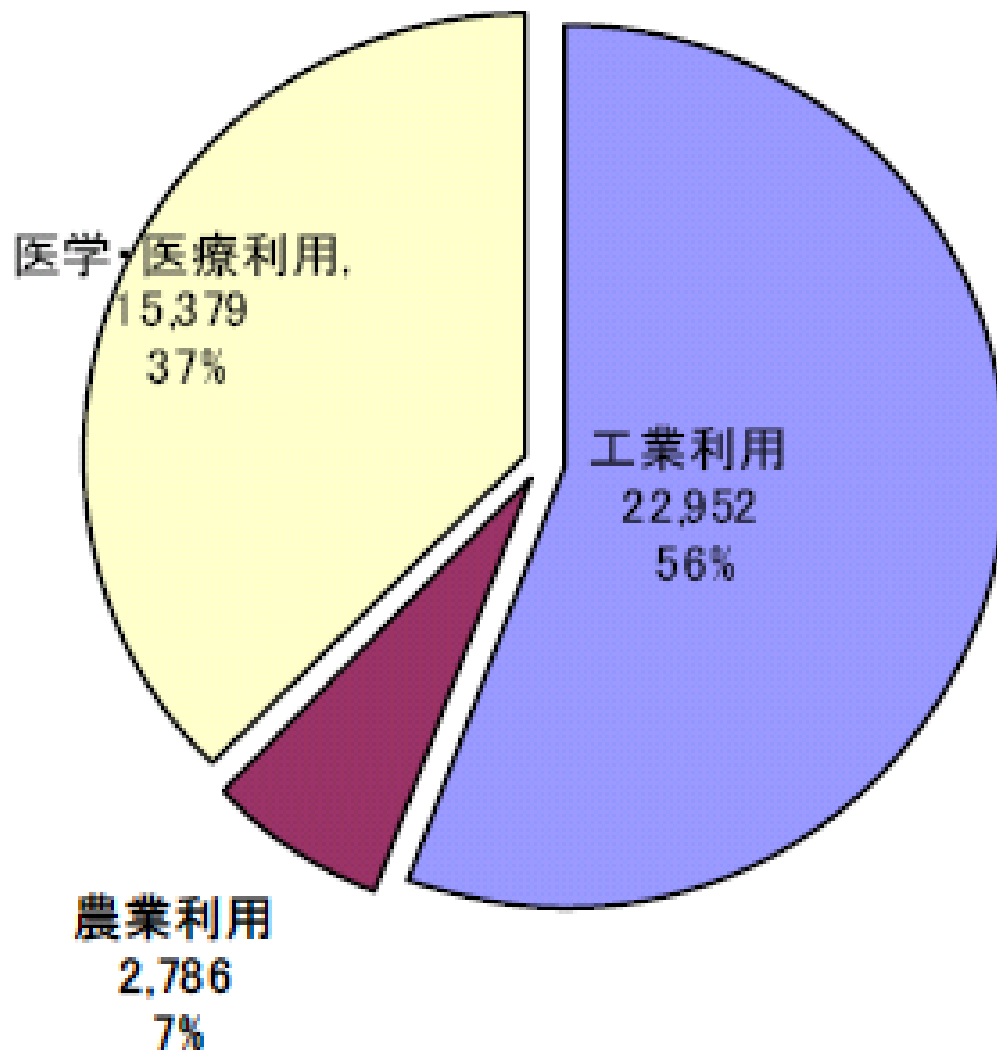
原子力委員会資料より(日本原子力研究開発機構の調査)

原子力エネルギー利用経済規模
原子力発電需要端+原子炉機器等輸出額(億円)

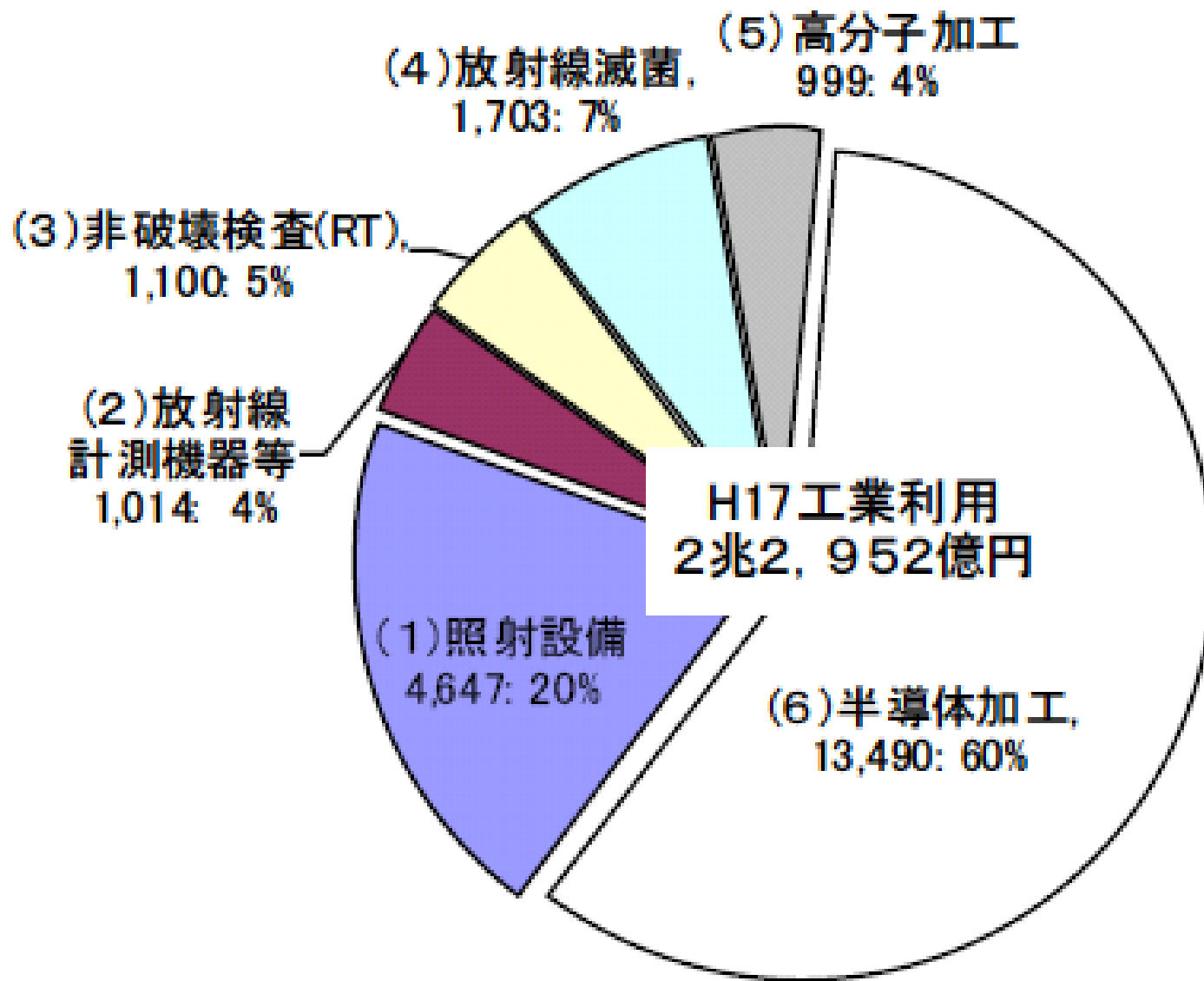


エネルギー利用

総額4兆1,117億円



工業、農業、医学・医療利用



平成17年度 工業利用 出荷額

半導体は出荷額の25%、ラジアルタイヤは4%を寄与率とした。

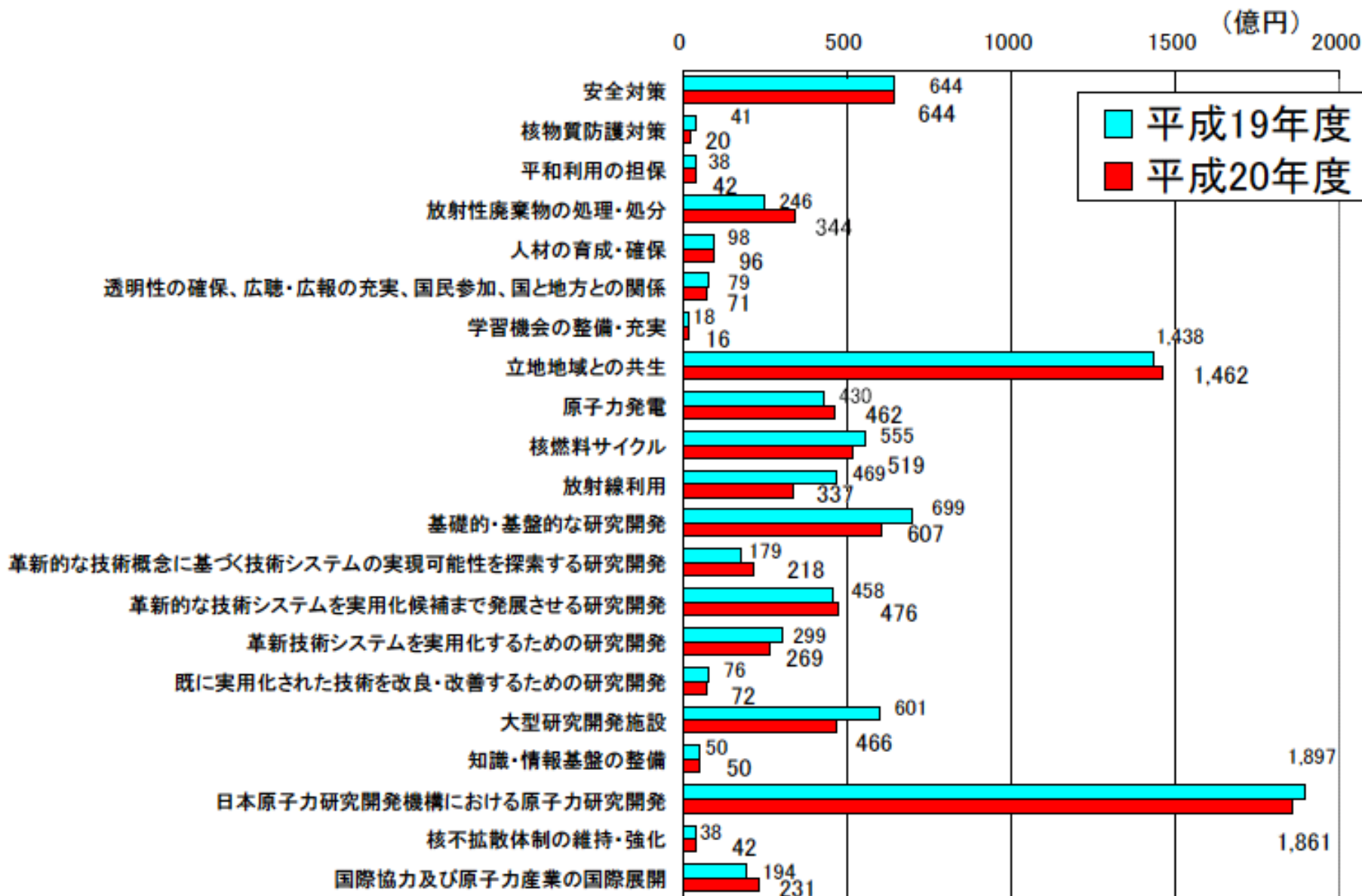


図1-1 平成19年度予算額と平成20年度予算額の推移

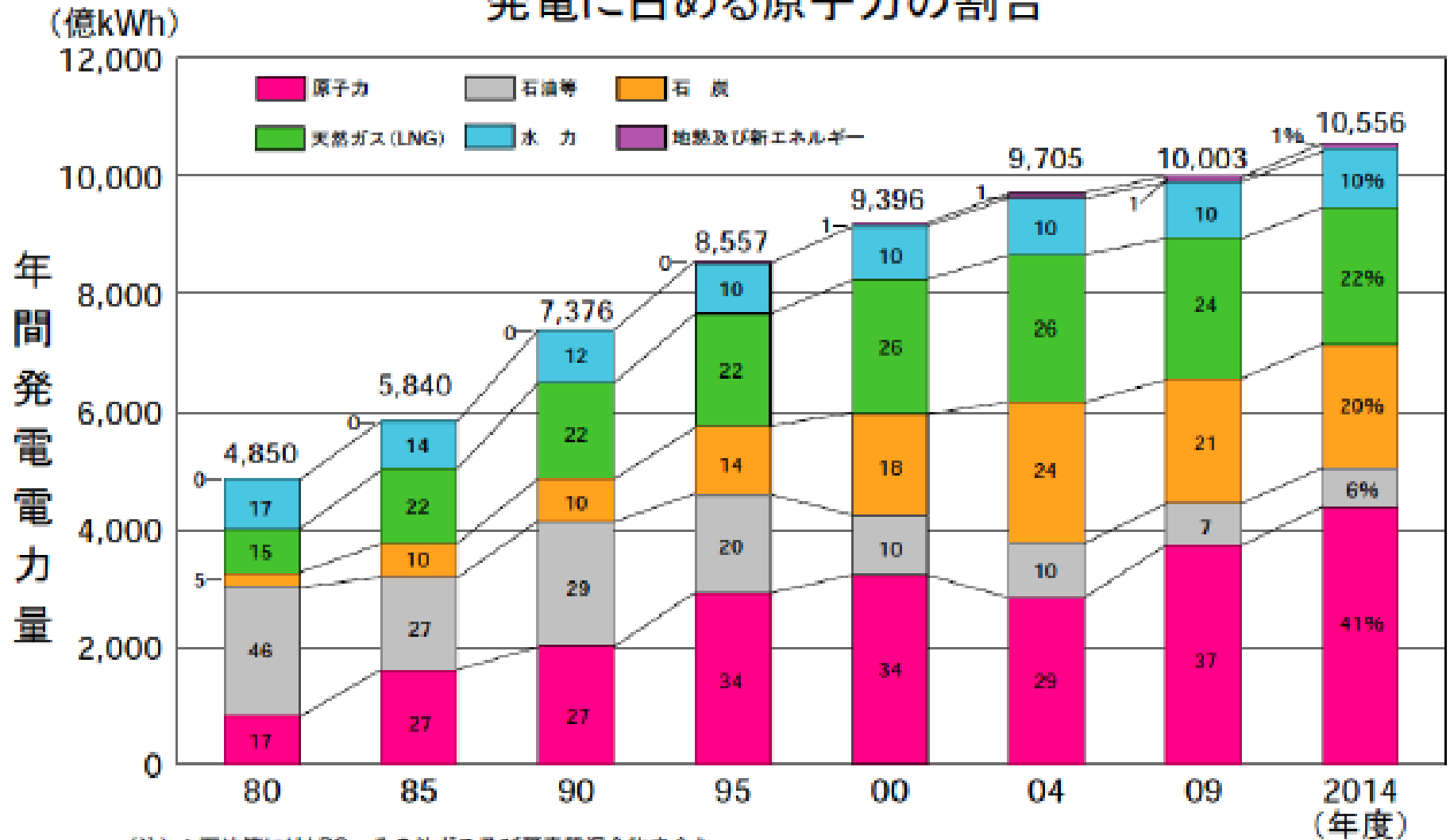
エネルギー利用

現状と最近の国の方針

原子力発電所および核燃料施設



発電に占める原子力の割合



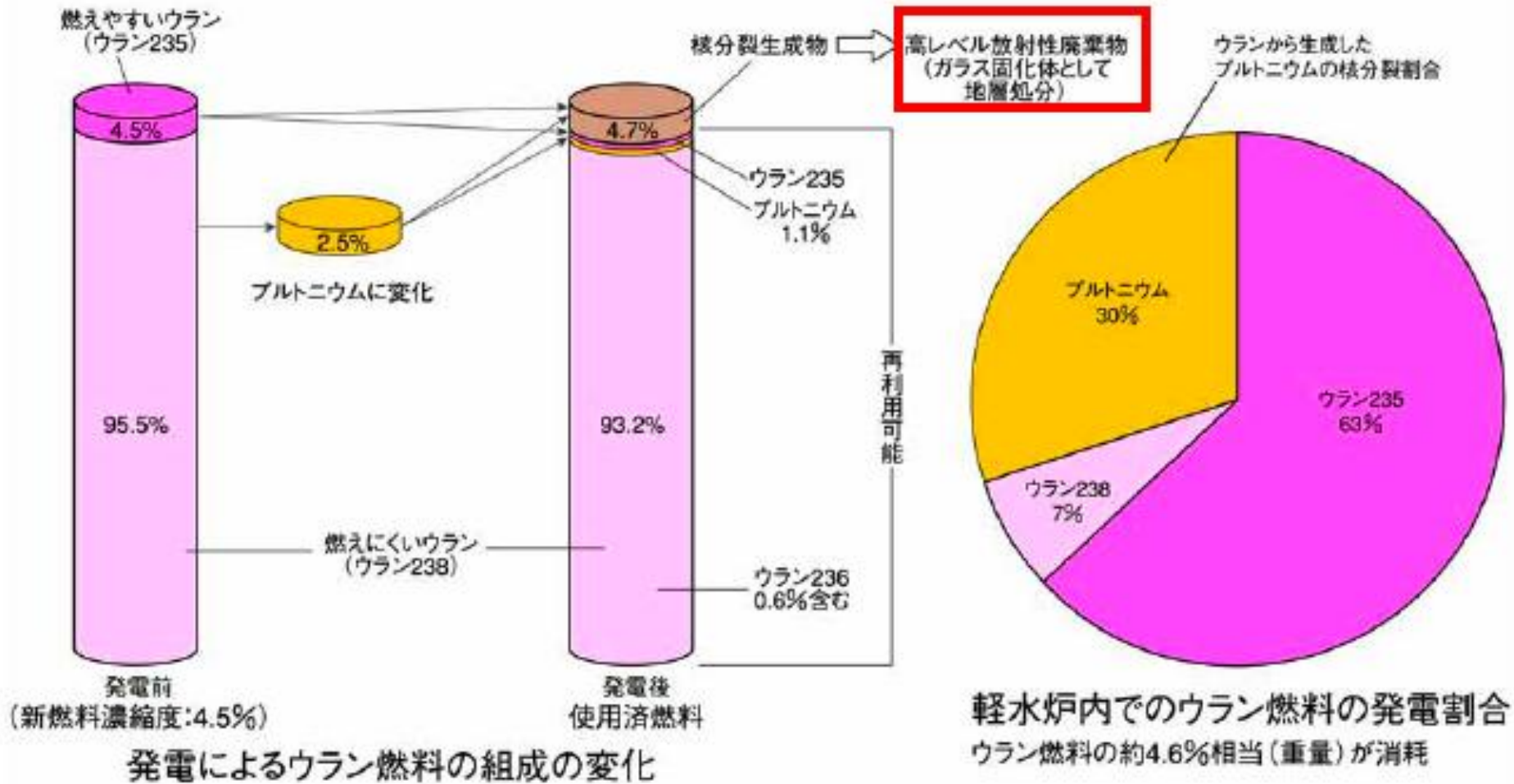
- (注) 1.石油等にはLPG、その他ガス及び瀝青質混合物を含む。
 2.四捨五入の関係で合計値が合わない場合がある。
 3.10電力計、受電を含む。
 4.グラフ内の数値は構成比(%)示す。

出典：平成17年度供給計画の概要（平成17年3月）他

出典：「原子力・エネルギー」図面集2005-2006

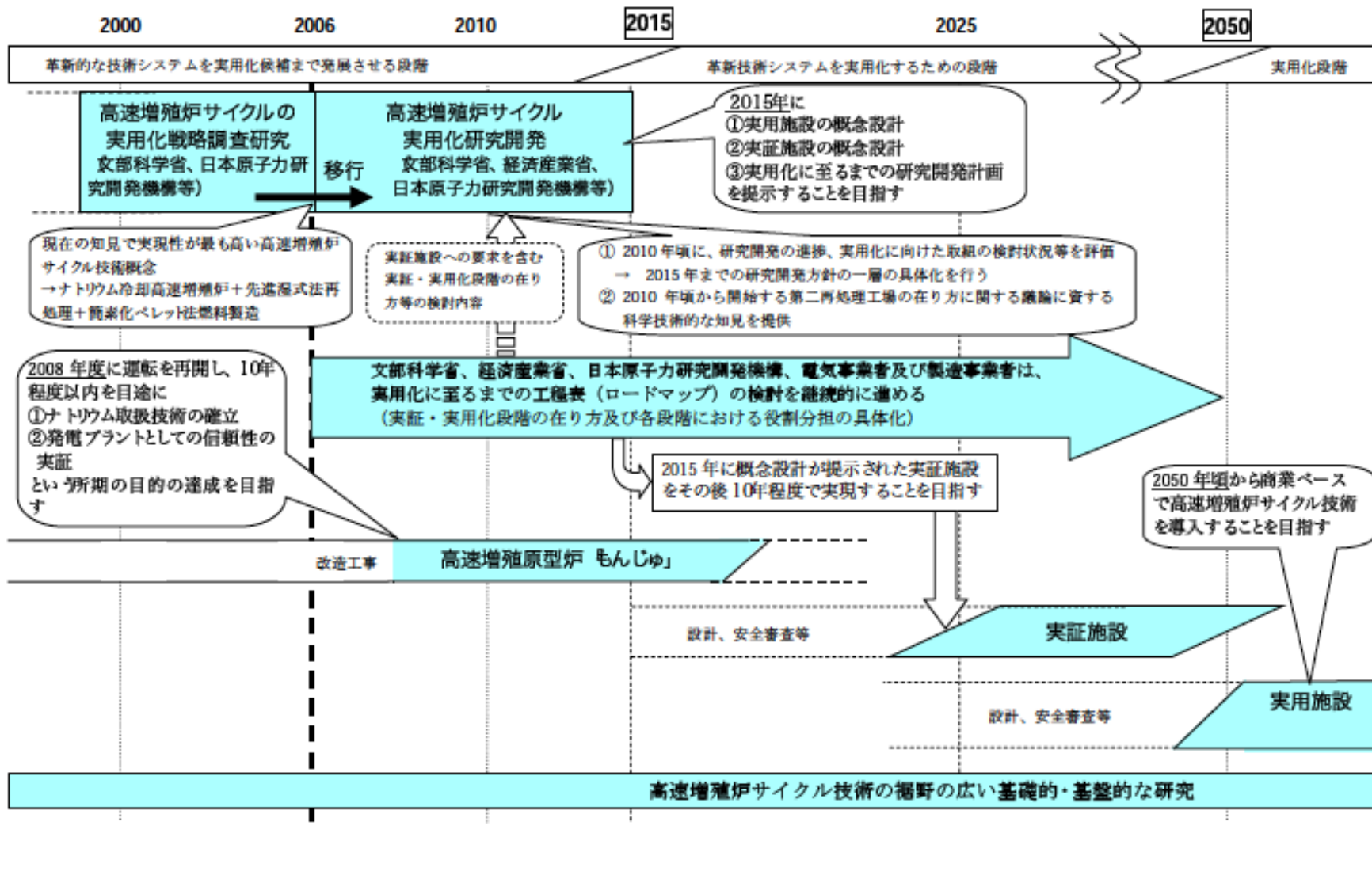
軽水炉内でのウラン燃料の燃焼による変化

〈エネルギー生産量:燃焼度(平均):45,000MWD/tUの場合〉



原子力委員会の方針

原子力委員会の定める高速増殖炉サイクル技術の今後10年程度の間における研究開発に関する基本方針を踏まえた
 実用化に至るまでの取組のイメージ



原子力立国計画（経済産業省）

○原子力政策大綱（2005年10月閣議決定）で基本目標を設定。

- ①2030年以後も発電電力量の30～40%程度以上
- ②核燃料サイクルを推進
- ③高速増殖炉の実用化を目指す

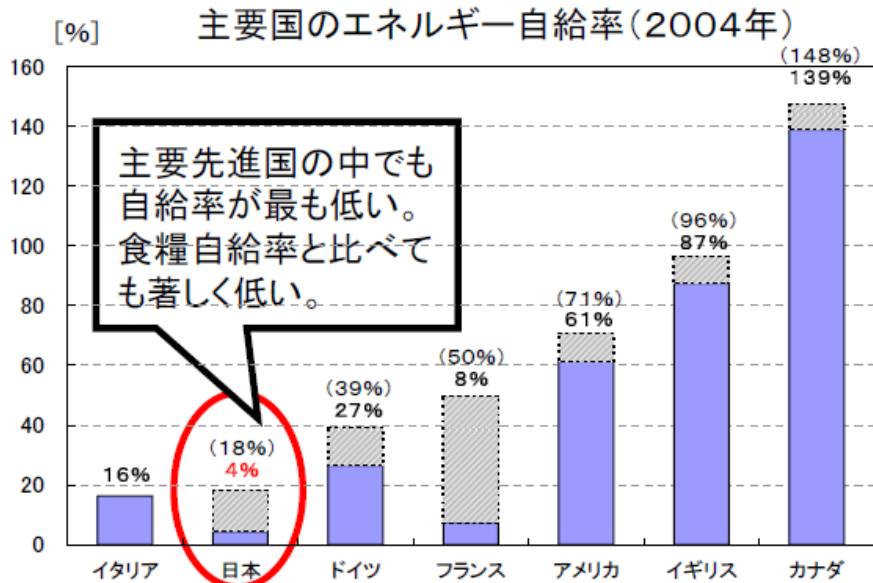
○基本目標を実現するための具体策について、総合資源エネルギー調査会電気事業分科会原子力部会を開催し、2006年8月、「原子力立国計画」をとりまとめ。

○「原子力立国計画」は「新・国家エネルギー戦略」の一部を構成。今年度末のエネルギー基本計画改定（閣議決定）の一部となる。

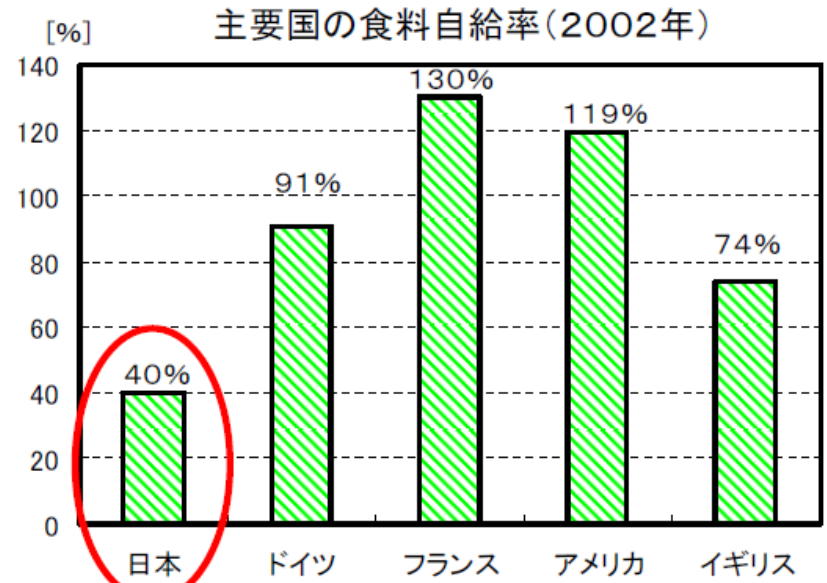
1. 背景 — なぜ日本で原子力を進めるのか？

(日本の自給率)

- 原子力を除けば、主要先進国の中で、我が国のエネルギー自給率は最も低く、わずか4%。
- 我が国の食料自給率でも4割であり、それよりも遙かに低い。



※自給率は原子力を輸入とした場合(カッコ内は原子力を国産とした場合)
 【出典:OECD/IEA “Energy Balances of OECD Countries 2003-2004”】

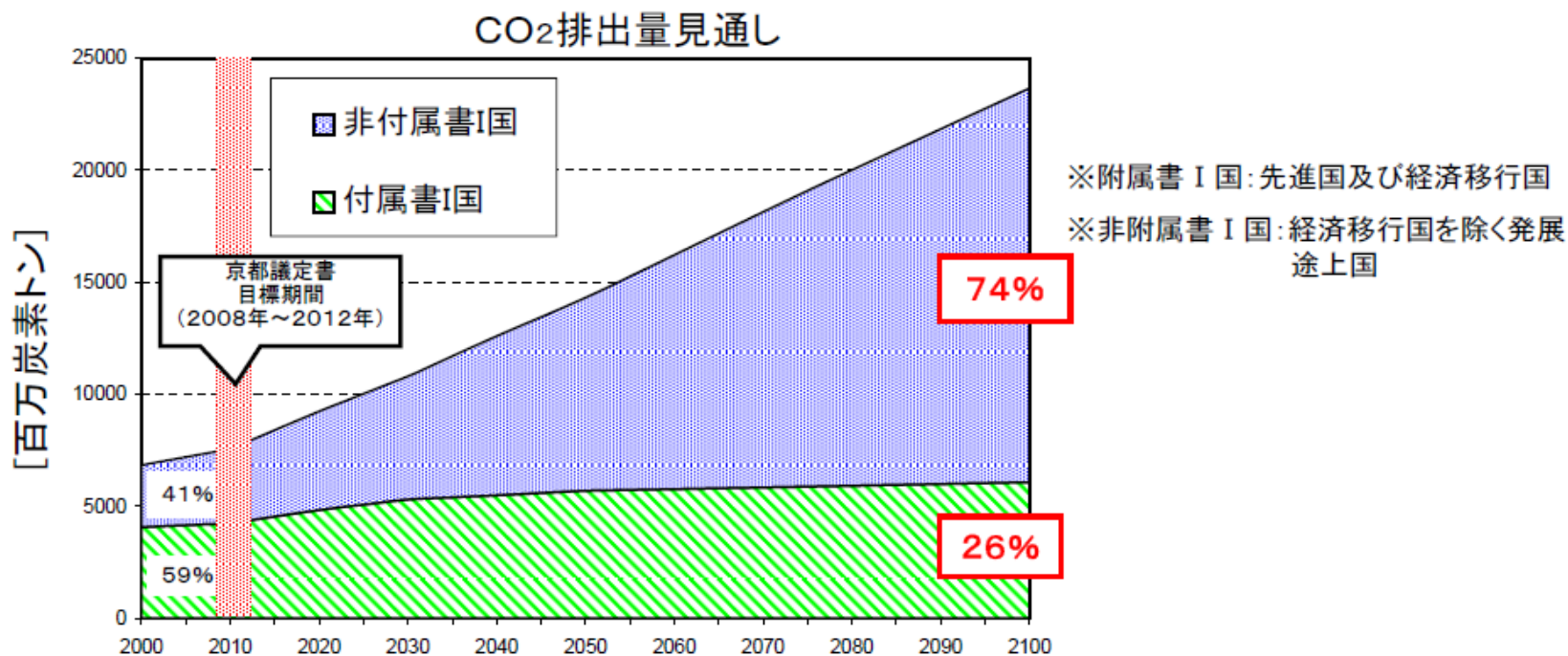


【出典:平成16年度食料自給率レポート(農林水産省)】

1. 背景 — なぜ日本で原子力を進めるのか？

(地球温暖化の防止 ①)

- 世界のエネルギー消費の増大に伴い、世界のCO₂排出量も大幅に増加し、2100年には現在の3倍以上になる可能性がある。
- 特に発展途上国の伸びは著しく、2020年～2030年頃には先進国を抜き、2100年には現在の約6倍、先進国の約3倍となるなど、世界のCO₂排出量の増加のほとんどを占めると見込まれる。

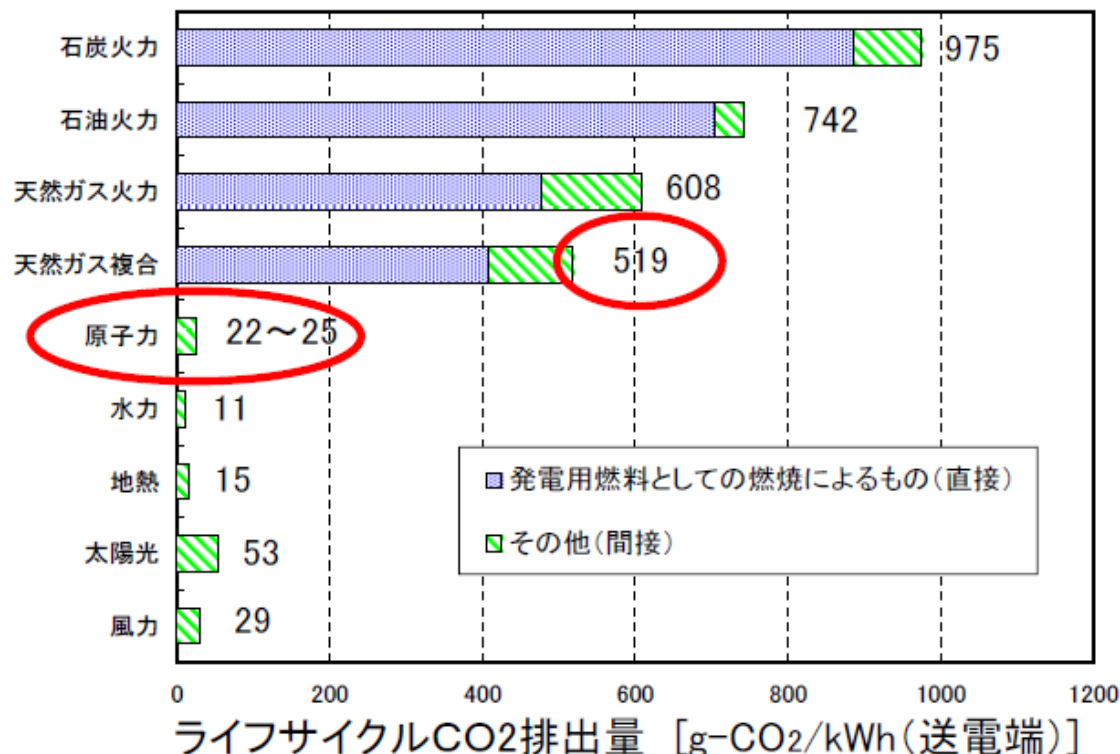


1. 背景 — なぜ日本で原子力を進めるのか？

(地球温暖化の防止 ②)

○発電所の建設、燃料の輸送などを含めたライフサイクル全体で見ると、天然ガスは石油と比べてCO₂排出量を3割程度削減できるが、それでもなお、原子力の約22倍のCO₂を排出する。

各種電源の発電量当たりのCO₂排出量(メタンを含む)



【出典：原子力については、電力中央研究所「ライフサイクルCO₂排出量による原子力発電技術の評価 平成13年8月」。他電源については、電力中央研究所「ライフサイクルCO₂排出量による発電技術の評価 平成12年3月」】

IV. 原子力政策の今後の取組

基本目標（『原子力政策大綱』2005年10月閣議決定）

- ① 2030年以後も、発電電力量の30～40%程度以上の役割を期待
- ② 核燃料サイクルを着実に推進
- ③ 高速増殖炉の2050年の商業ベース導入を目指す など

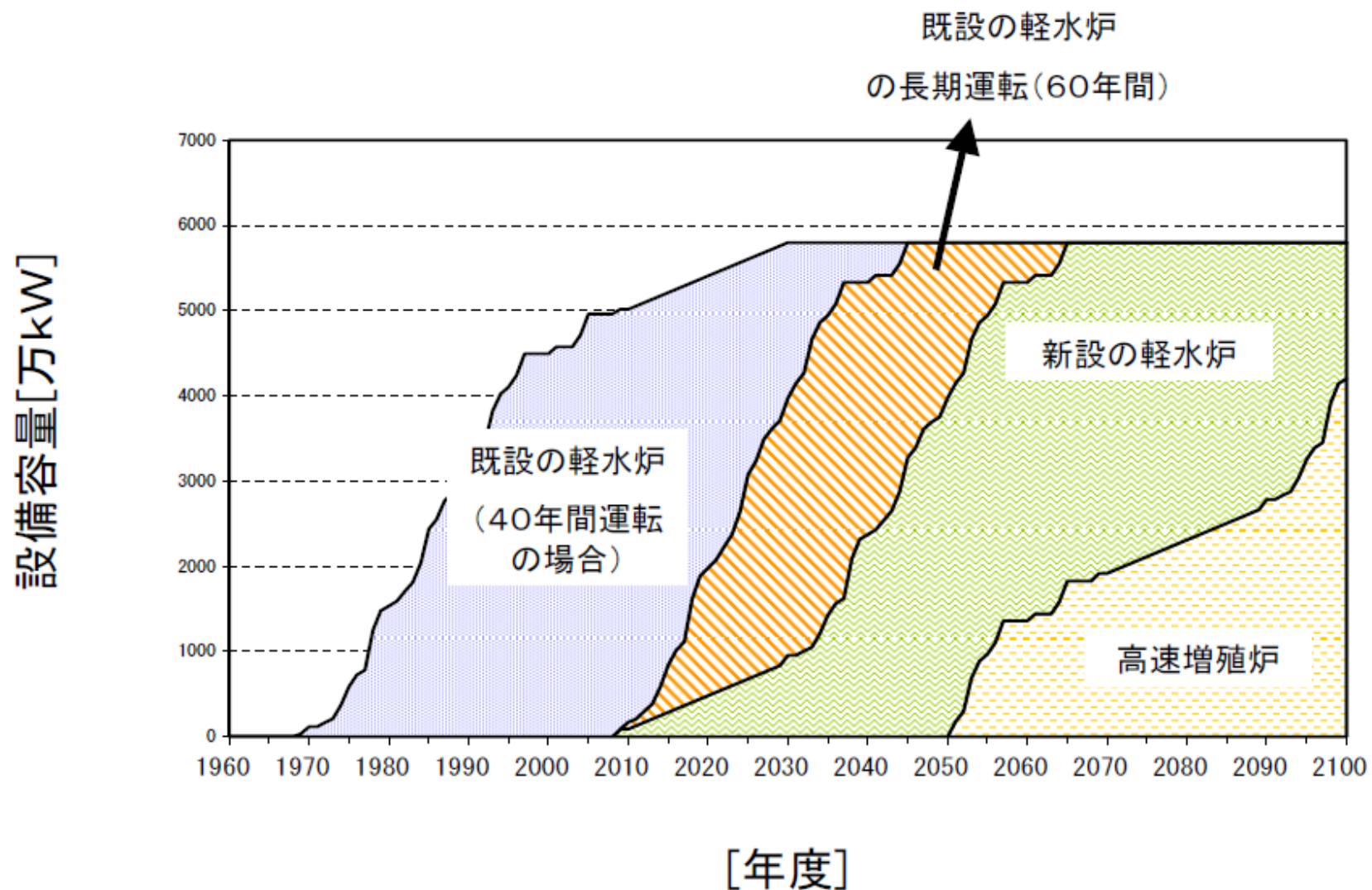
○原子力委員会の策定した「原子力政策大綱」の目標を実現するための政策について審議するため、約4年ぶりに総合資源エネルギー調査会原子力部会を開催。

○2005年7月以降2つの小委員会（電力自由化と原子力に関する小委員会、放射性廃棄物小委員会）を含めて27回審議し、パブリックコメントも踏まえ、2006年8月に「原子力立国計画」としてとりまとめ。

実現方策（『原子力立国計画』2006年8月策定）

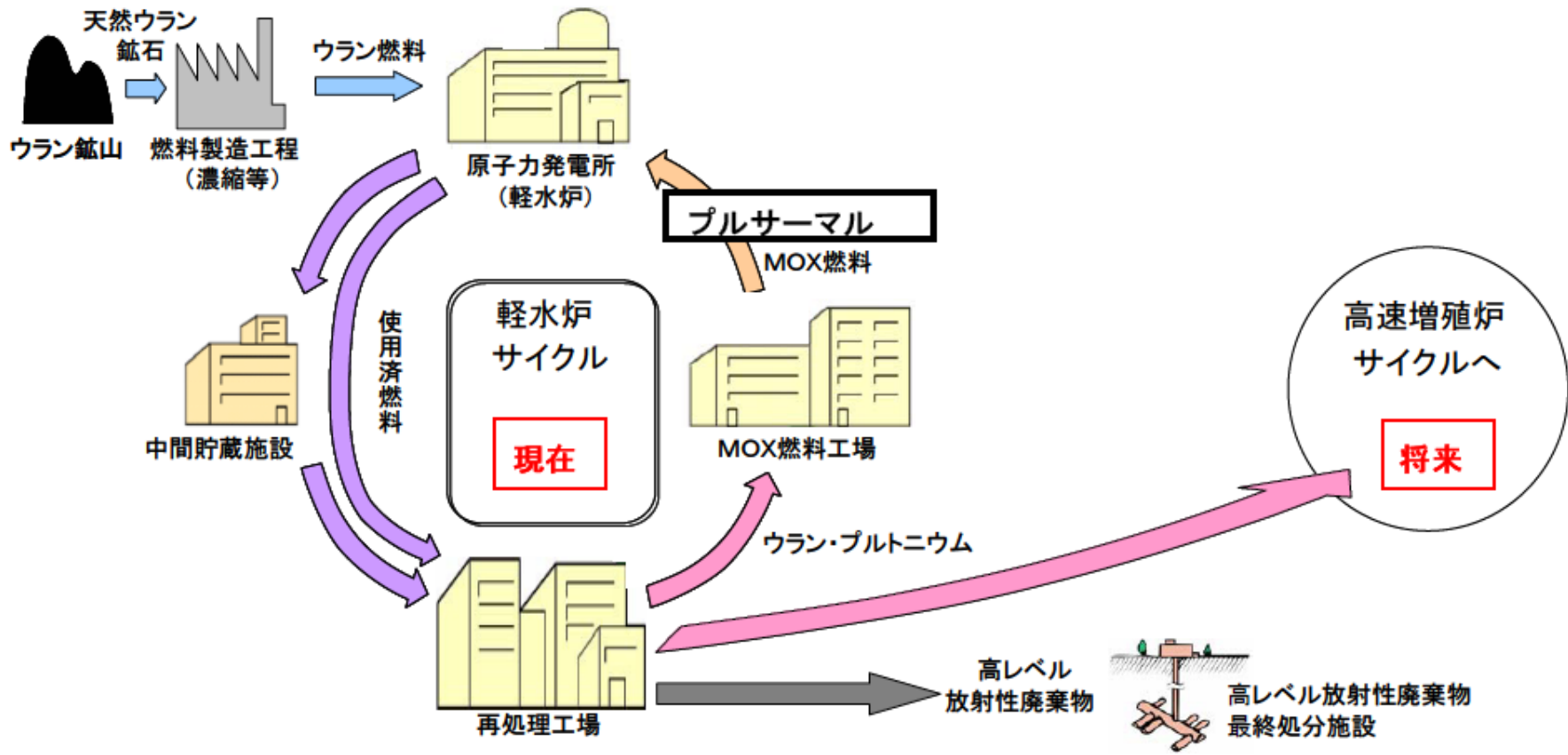
- ① 電力自由化時代の原子力発電の新・増設、既設炉リプレース投資の実現
- ② 安全確保を大前提とした既設原子力発電所の適切な活用
- ③ 核燃料サイクルの着実な推進とサイクル関連産業の戦略的強化
- ④ 高速増殖炉サイクルの早期実用化
- ⑤ ウラン資源確保戦略
- ⑥ 技術・産業・人材の厚みの確保・発展
- ⑦ 我が国原子力産業の国際展開支援
- ⑧ 原子力発電拡大と核不拡散の両立に向けた国際的な枠組み作りへの積極的関与
- ⑨ 国と立地地域の信頼関係の強化、きめの細かい広聴・広報
- ⑩ 放射性廃棄物対策の着実な推進

(参考) 原子力発電の中長期的方向(イメージ)

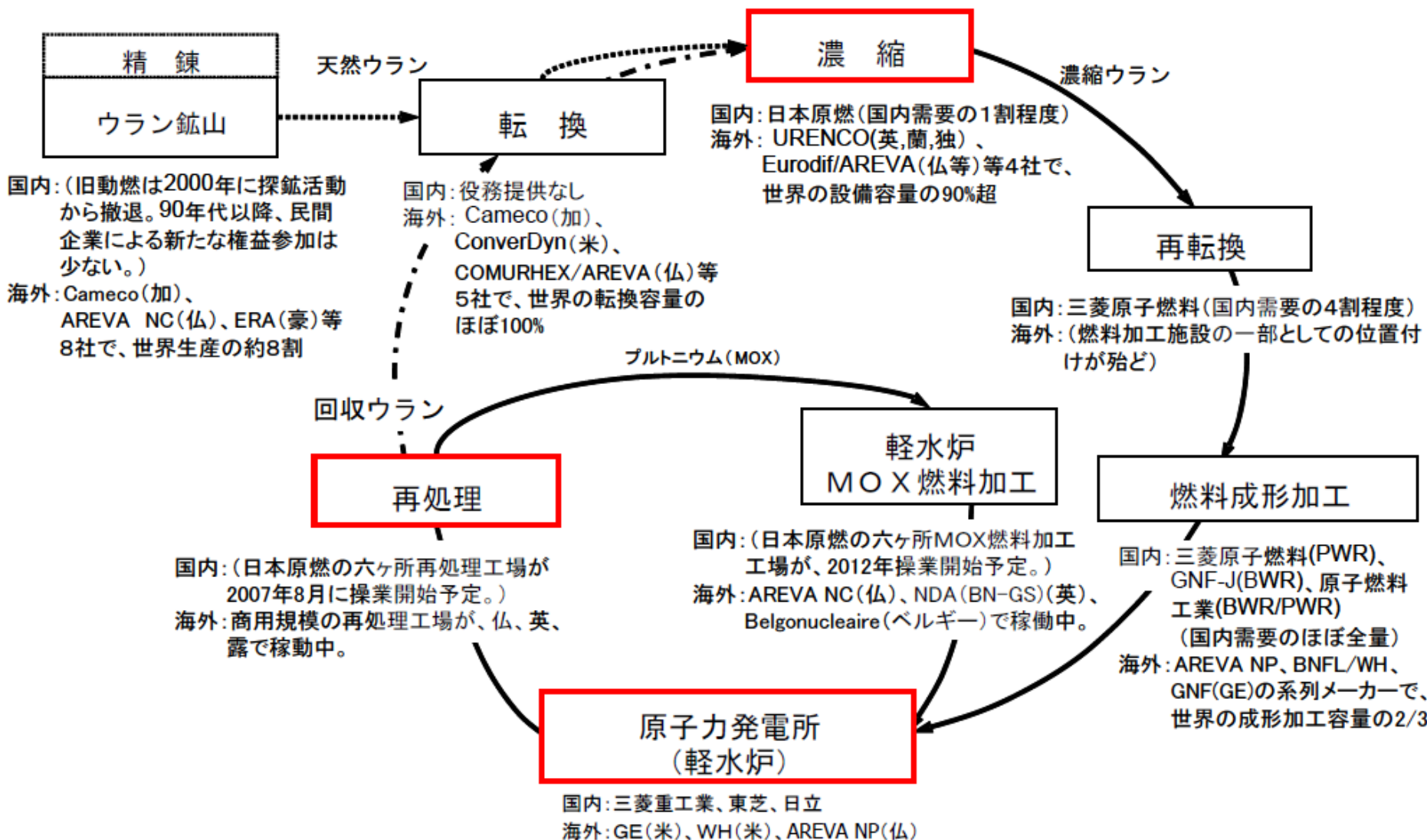


※上の図は、イメージを示すためのものであり、設備容量は58GWで一定と仮定。

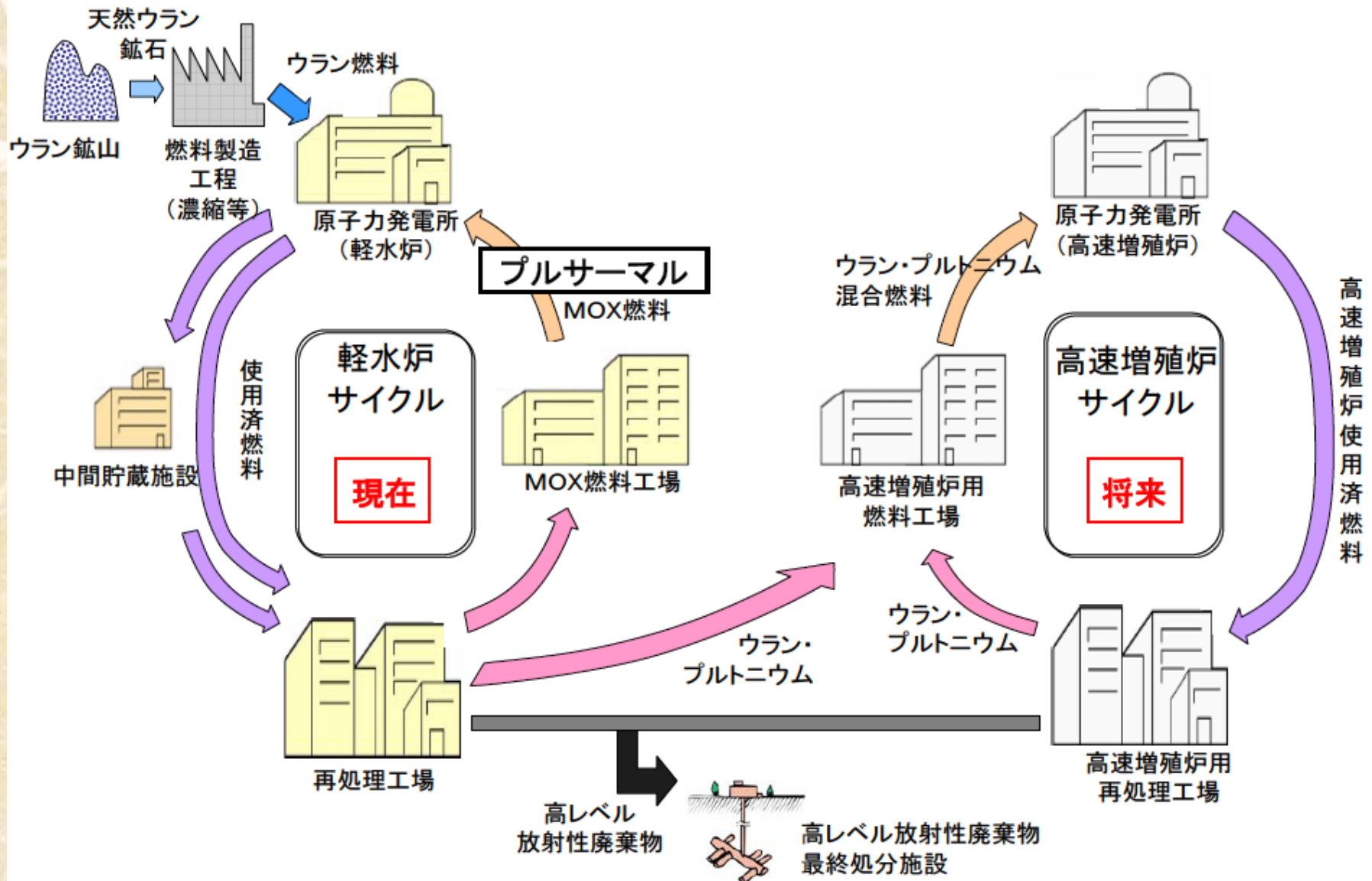
4. 核燃料サイクルの着実な推進とサイクル関連産業の戦略的強化 (軽水炉核燃料サイクル)



4. 核燃料サイクルの着実な推進とサイクル関連産業の戦略的強化 (核燃料サイクル関連産業)



5. 高速増殖炉サイクルの早期実用化 (核燃料サイクル)

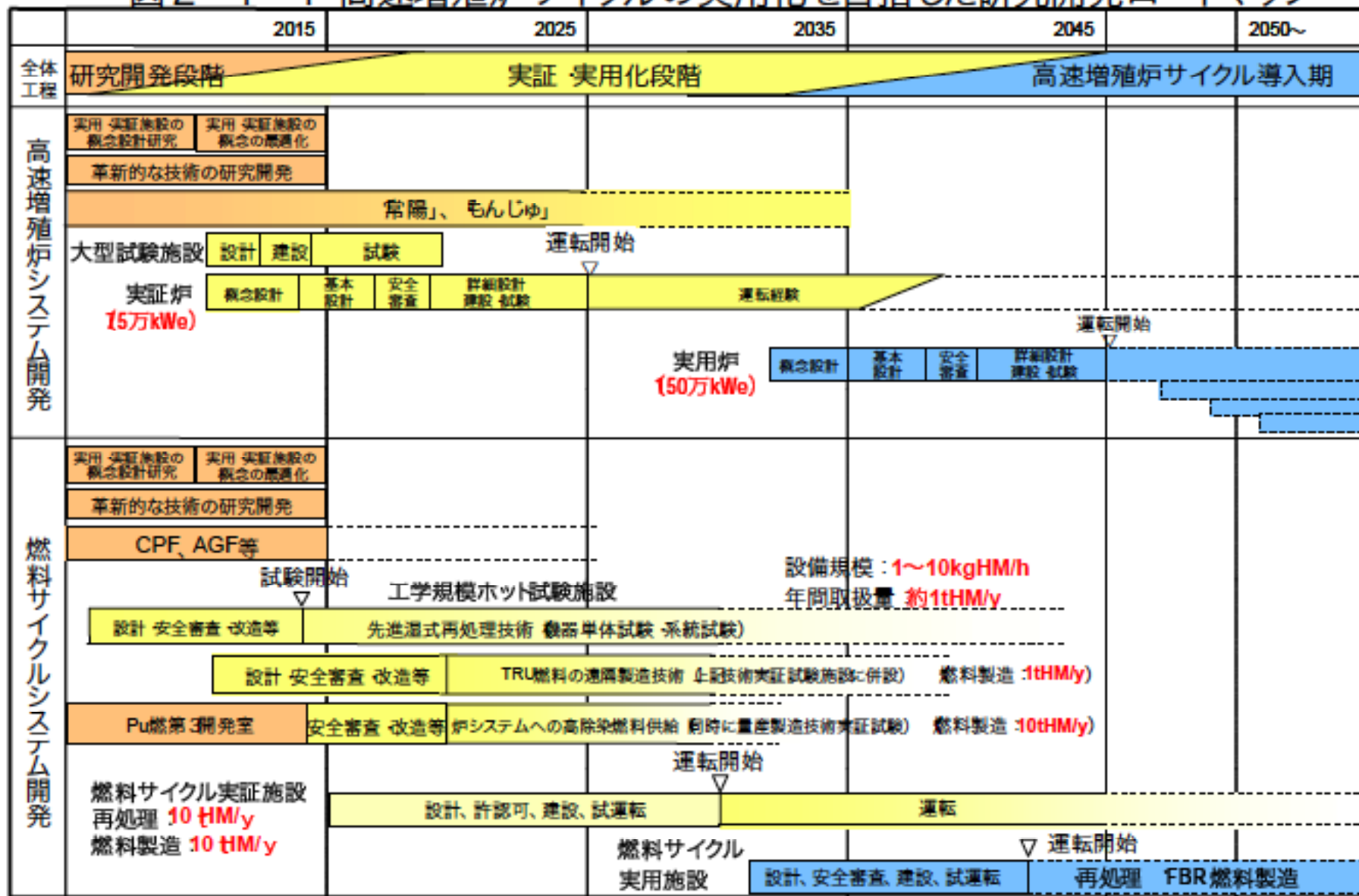


9. 原子力発電拡大と核不拡散の両立に向けた 国際的な枠組み作りへの積極的関与 (各国の原子力発電・再処理の現状)

	国名	原発数	再処理施設	備考
核燃料サイクル国	日本	55	○	東海、六ヶ所
	米国	103	×	これまで使用済燃料を直接処分する方針であったため、商業用再処理は行っていない。 再処理の研究は実施。
	フランス	59	○	ラ・アーグ
	ロシア	31	○	チャリャピンスクー40(マヤーク)
	英国	23	○	セラフィールド
	中国	9	△ (パイロットプラント)	フランスの協力で大規模再処理施設の建設計画有。
その他の原子力発電国	インド	15	○	タラプール、カルパカム
	韓国	20	×	
	ドイツ	17	×	
	カナダ	18	×	
	スウェーデン	10	×	
	スペイン	9	×	
	その他	71		
総計		440		
原子力発電導入検討国	ベトナム		×	2017～2020年に運転開始を目指す。
	インドネシア		×	2020年までに運転開始を目指す。

文部科学省

図 2-1-1 高速増殖炉サイクルの実用化を目指した研究開発ロードマップ



※本ロードマップは2015年までの研究開発計画を作成するにあたり想定したもの

(1) 高速増殖炉実用化に向けた原型炉としての役割

「もんじゅ」は実証炉・実用炉の設計、運転保守に不可欠

- 発電プラントとしての信頼性実証
- 運転経験を通じたナトリウム取扱技術の確立
- 高速増殖炉実用化に向けた研究開発等の場としての活用・利用(炉心・燃料に係る高度化技術実証)

(2) 高速増殖炉の国際協力における役割

「もんじゅ」を用いた先導的国際プロジェクト

- 例:「もんじゅ」を利用した「包括的アクチノイドサイクル国際実証」プロジェクト*

※日仏米共同研究(実施中)

(3) 高速増殖炉研究開発の中核としての役割(立地地域への貢献)

「もんじゅ」及び周辺地域を国際的な研究開発の中核として整備

- 海外・国内研究機関、地域企業等と連携して研究開発を推進

高速増殖炉発電所の国内技術の確立



運転・保守経験

研究開発

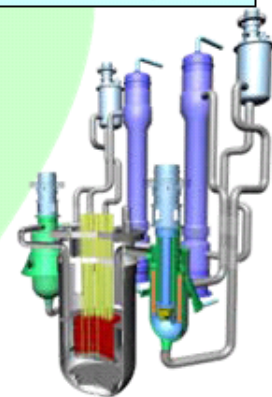
商業炉(実用炉)
2050年より前の開発

高い経済性
安定運転

実証炉

2025年頃の実現

経済性を含む革新的技術の実証
高い稼働率の運転



実用化研究開発
(FaCTプロジェクト)

革新的な技術の研究開発

高速増殖炉の意義:

- ・ 発電しながら消費した以上の燃料を生産
⇒ エネルギー安定供給に大きく貢献
- ・ 放射性廃棄物中のマイナーアクチノイドを燃料として再利用
⇒ 環境負荷を低減
- ・ 長期かつ持続的に温室効果ガス排出が十分小さい発電が可能
⇒ 温暖化抑制

高速増殖炉は次世代発電炉の本命

『もんじゅ』における研究開発及びこれに関連する研究開発に係る
研究開発・評価委員会による事前評価結果について

資料1 添付3

平成21年12月15日

次世代原子力システム/核燃料サイクル研究開発・評価委員会

研究開発・評価委員会：平成21年11月5日答申

プロジェクトレビュー(技術的評価)

- (対象)
研究開発計画に関して
- (視点)
・発電プラントとしての信頼性実証
・運転経験を通じたナトリウム取扱技術の確立
・FBR実用化に向けた研究開発の場としての活用・利用

マネジメントレビュー(大局的評価)

- (対象)
研究開発実施体制に関して
- (視点)
・組織体制及び外部機関との連携
・機構におけるPDCAと意思決定
・要員確保(計画)と人材育成・技術継承
・国際協力と情報管理及び情報発信
・品質保証

評価(総括)

・マネジメントについては、2015年までの原子力機構における研究開発体制等の枠組み及び運用方法は準備されていると評価する。

・プロジェクトについては、2015年までの研究開発計画の内容として必要な重要技術事項が包含され、さらに、長期に亘る研究開発を5年程度で区切りその都度チェックをしていく進め方を採用しており、技術的に十分検討された研究開発計画であると評価する。

・ただし、いずれについても、いくつかの留意点を指摘し、研究開発が一層効果的に実施され、より良い研究開発成果が生み出されることを期待することとした。

主要な答申(指摘)

【プロジェクトレビュー】

① 研究開発の実施においては、最新の科学技術の知見を常に取入れる努力を行い、その反映先として実証炉を念頭に置くこと。 【総論】

② 本評価期間においては、「もんじゅ」の設計技術評価の集大成とすべく、性能試験及び原型炉技術評価を行うために、研究開発部門はその力を本評価に集中すること。 【総論】

③ 安全・安定運転を達成し、ナトリウム冷却FBRの運転実績をあげることは、ナトリウム取扱技術の実際のFBRにおける確立に繋がり、結果としてFBR開発の強力な推進力となることから、安全・安定運転継続の意義を常に意識する必要がある。 【発電プラントとしての信頼性実証】

④ 「もんじゅ」において着実に運転実績を蓄積し、実証炉・実用炉の合理的な保全を支える機器・部品の劣化データ等の実データを取得することが重要である。 【発電プラントとしての信頼性実証】

⑤ 性能試験結果を用いて原型炉技術評価を行い、その成果を実証炉・実用炉に反映する方法における解析手法は、実証炉への適用が保証される一般性が十分に担保されたモデルに基づく手法でなくてはならない。 【発電プラントとしての信頼性実証】

⑥ 2015年までは「もんじゅ」の運転実績を積みながら有効な保全方法・技術を広く検討し、その後、技術の選択と集中を行うとしているが、保全技術を高度化し、実証炉・実用炉へ適用していくためには、可能性のある技術について、2015年以降も引き続き検討すべきである。 【運転経験を通じたナトリウム取扱技術の確立】

⑦ 「もんじゅ」を実証炉の燃料開発の場として活用する際に、「もんじゅ」の制約の範囲内で採用可能な概念は積極的に取入れる必要がある。 【FBR実用化に向けた研究開発の場としての活用・利用】

【マネジメントレビュー】

⑧ 長期にわたる取り組みでは、研究開発計画の見直しを行うフィードバック体制の設計と運用が重要であり、適切にチェック機能を働かせる体制を設計することが重要である。 【組織体制及び外部機関との連携】

⑨ 研究開発の進展で一部の遅滞が全体の遅滞を引き起こすことの防止などのためにも、状況の変化を常に把握し、PDCAサイクルの循環時間を柔軟なものとして機能させるべきである。 【組織におけるPDCAと意思決定】

⑩ 人材育成・技術継承のために機構内の能力・キャリア開発のプログラムを整備するとともに、明示化させたキャリアパスモデルの構築を検討すべきである。 【要員確保(計画)と人材育成・技術継承】

⑪ 「もんじゅ」の情報は、高速増殖炉に関心を持つ全世界の人々が注目していることから、しかるべき情報管理の仕組みに基づいて適切に情報発信を行うことが望ましい。 【国際協力と情報管理及び情報発信】

⑫ 品質保証の形骸化・空転化を防止するために、定期的に研究開発現場の受け止め方について調査し、改善課題の提起を受ける体制を整備することが重要である。 【品質保証】

これまでの問題点と今後やるべきこと

自らやりたいことを要求するより国の方針に従い金のあるところへ動く傾向が大学の研究者にもある。

独立国でない（特に燃料問題）。核兵器のかけ。

物理学者と工学者の相互不信。大学と旧科学技術庁研究所の相互不信。旧通産省と旧科学技術庁と旧文部省、旧原研等と産業界と電力会社の協調性の問題。などがあった。

安全神話の崩壊。国民の不信、不安。

情報公開。リスクを正しく説明。過去のやり方への反省。

方針の決定は国民がする。専門家は正しい情報を出す役目。

原子力発電を止める場合も直ぐには止められない。その間の人材の育成と研究開発の必要性

国民が原子力関係者に期待していること に応えなければならない

原子力がエネルギー源として役立つことはよくわかっている。

放射線の利用が生活や医療に役立っていることもわかっている。

これらのことを強調しても原発建設を容認することにはならない。

国民の心配は**原子力システムの安全と使用済燃料の処理
処分**である。

この国民の心配を解消するための研究をすることをこれからの研究の中心にしなければならない

革新的安全原子カシステムの例

トリウムサイクル

特徴：トリウムをウラン233に変換して燃料とする。

核不拡散性。環境負荷低減。

トリウム溶融塩炉はかつて米国で成功している
加速器駆動（ADS）にすれば未臨界なので安全。

古川和男 トリウム溶融塩炉 加速器燃料増殖

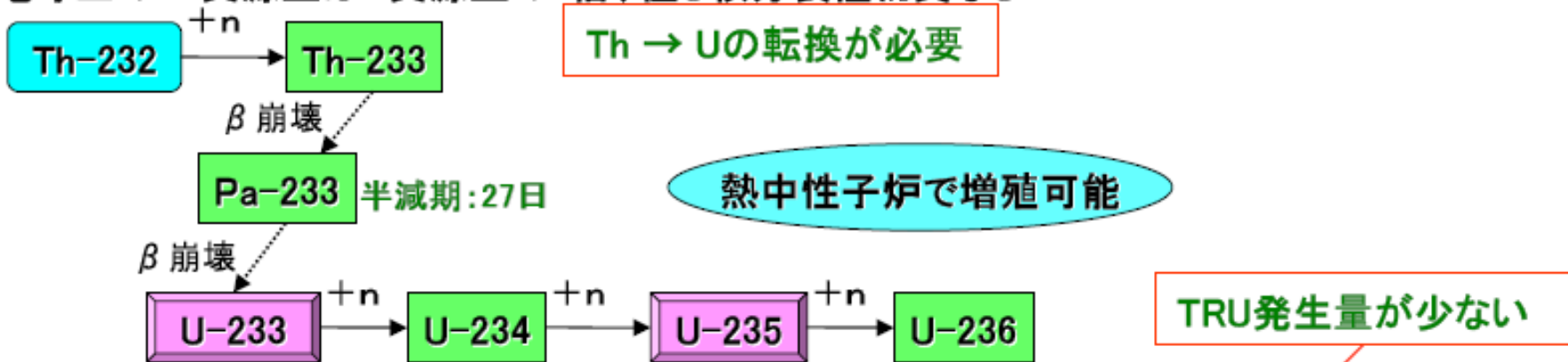
高橋 博 加速器駆動トリウム炉提唱

カルロ・ルビア 加速器駆動トリウム炉計画

Th-Uサイクル

トリウムサイクル研究

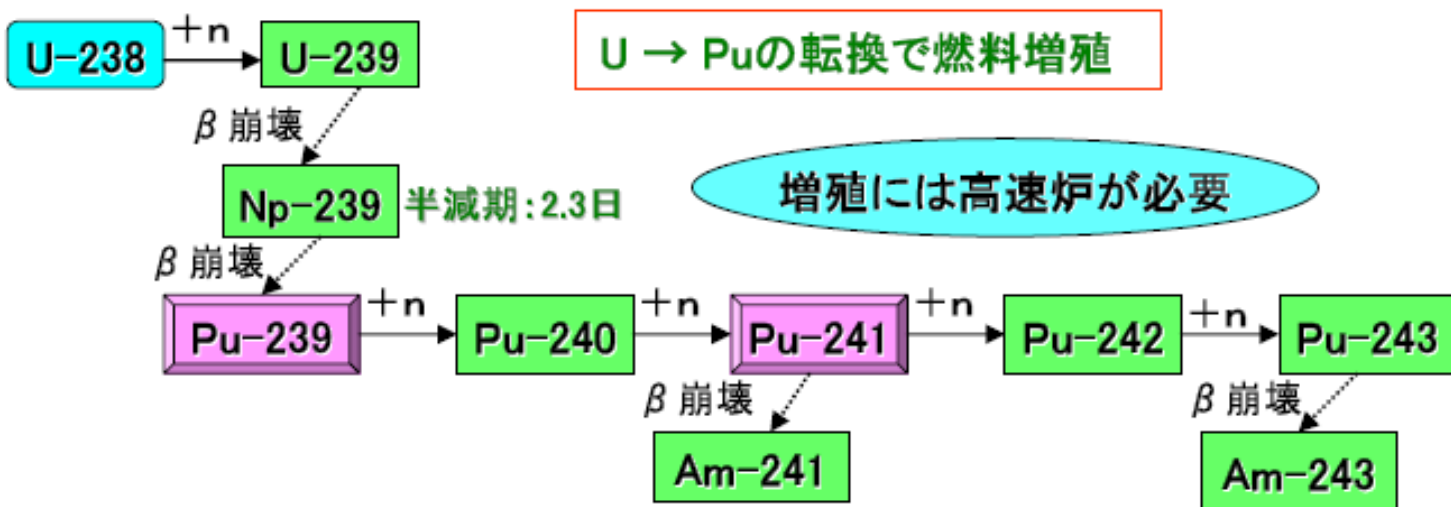
地球上のTh資源量はU資源量の3倍、但し核分裂性物質なし

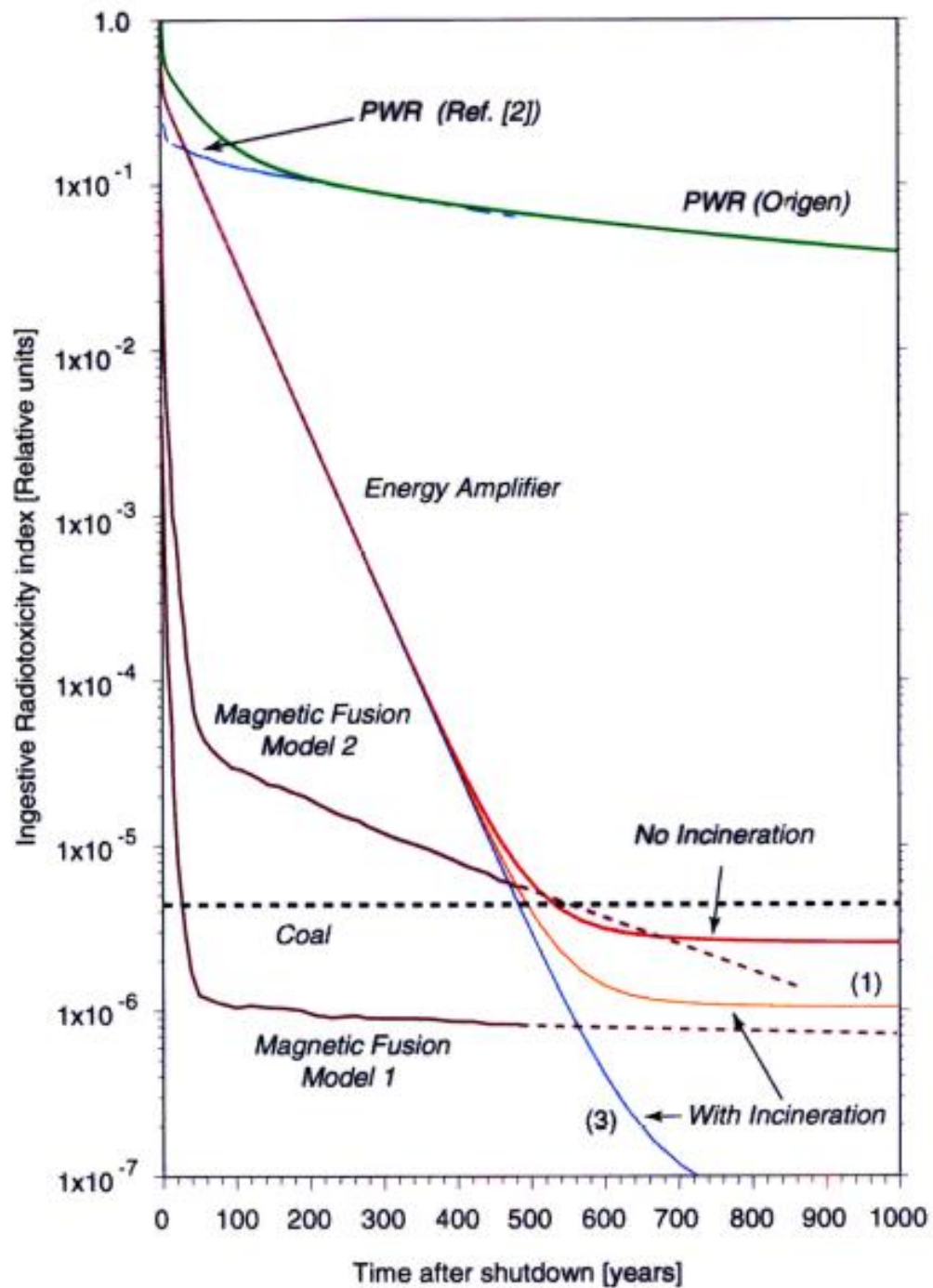


U-Puサイクル

U-Puサイクルで発生するTRUの核変換処理に期待

U資源中には核分裂性のU-235あり、99%以上がU-238







古川和男

2006年佐藤栄作賞
「核拡散防止」

最優秀賞

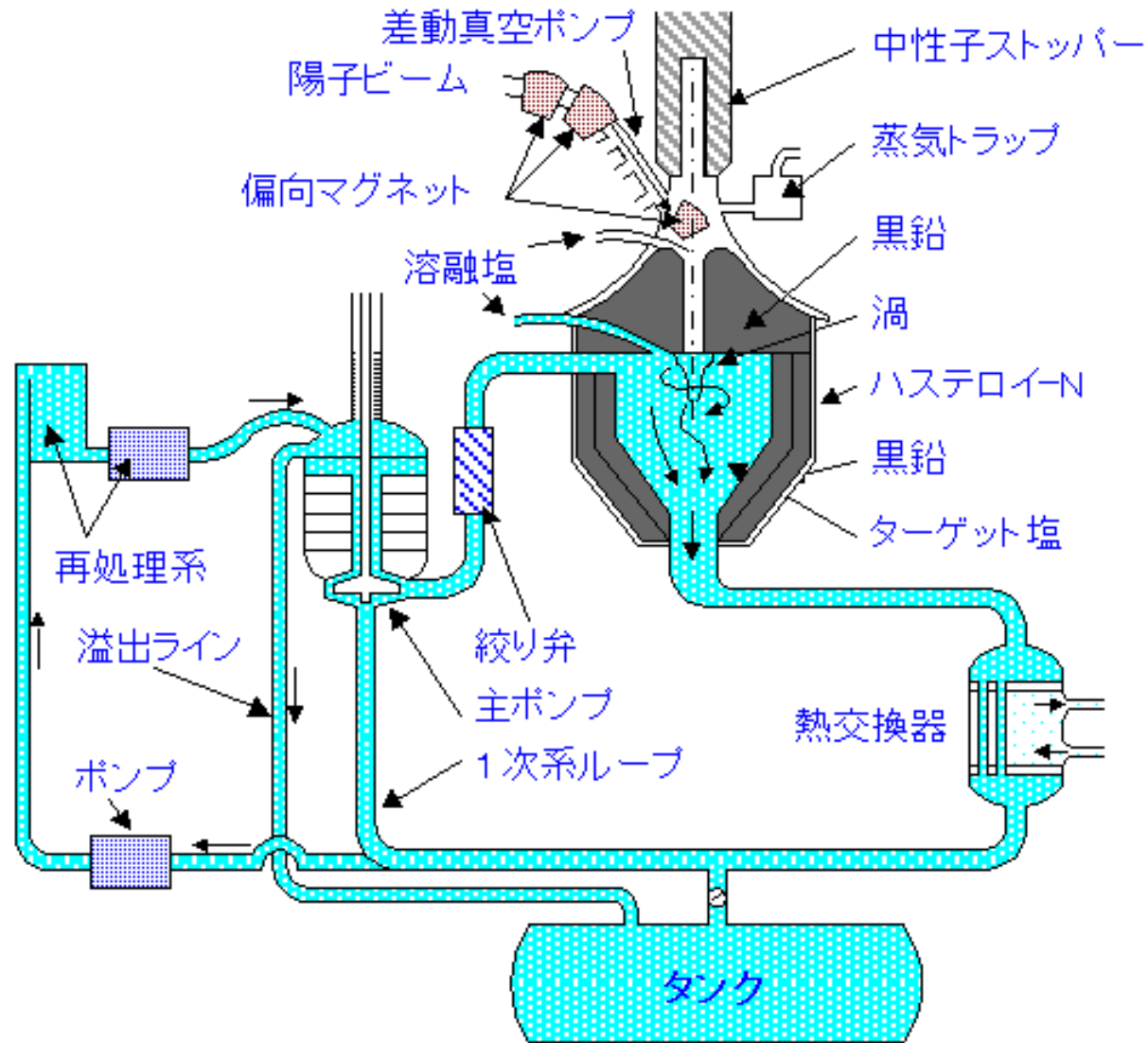


図8 加速器駆動増殖炉の概念図

[出典] IAEA: IAEA WORKING MATERIAL, THE STATUS OF THORIUM-BASED FUEL OPTIONS (to be published as IAEA TECDOC), (1996年) p.163

インドの原子力政策

国産のトリウム資源を活用して、最終的には、高速増殖炉による「トリウム・サイクル」の確立を目標。現在は第2段階。

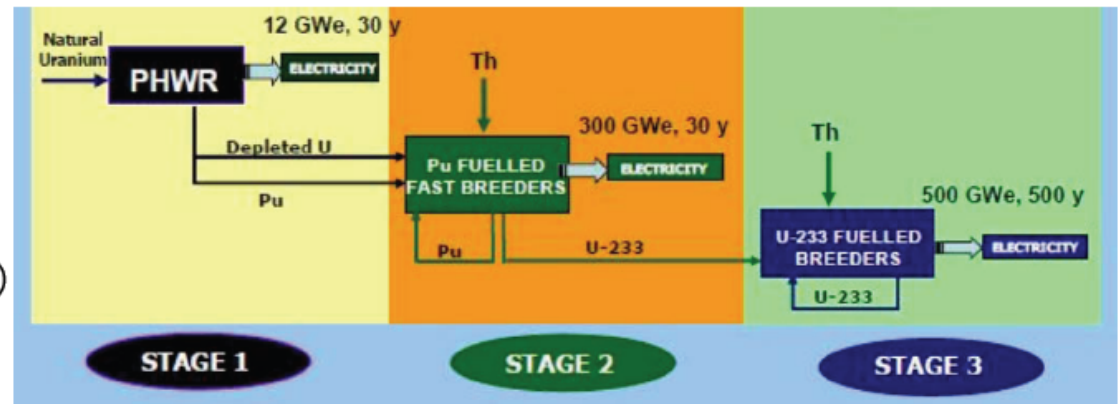
<国内資源>

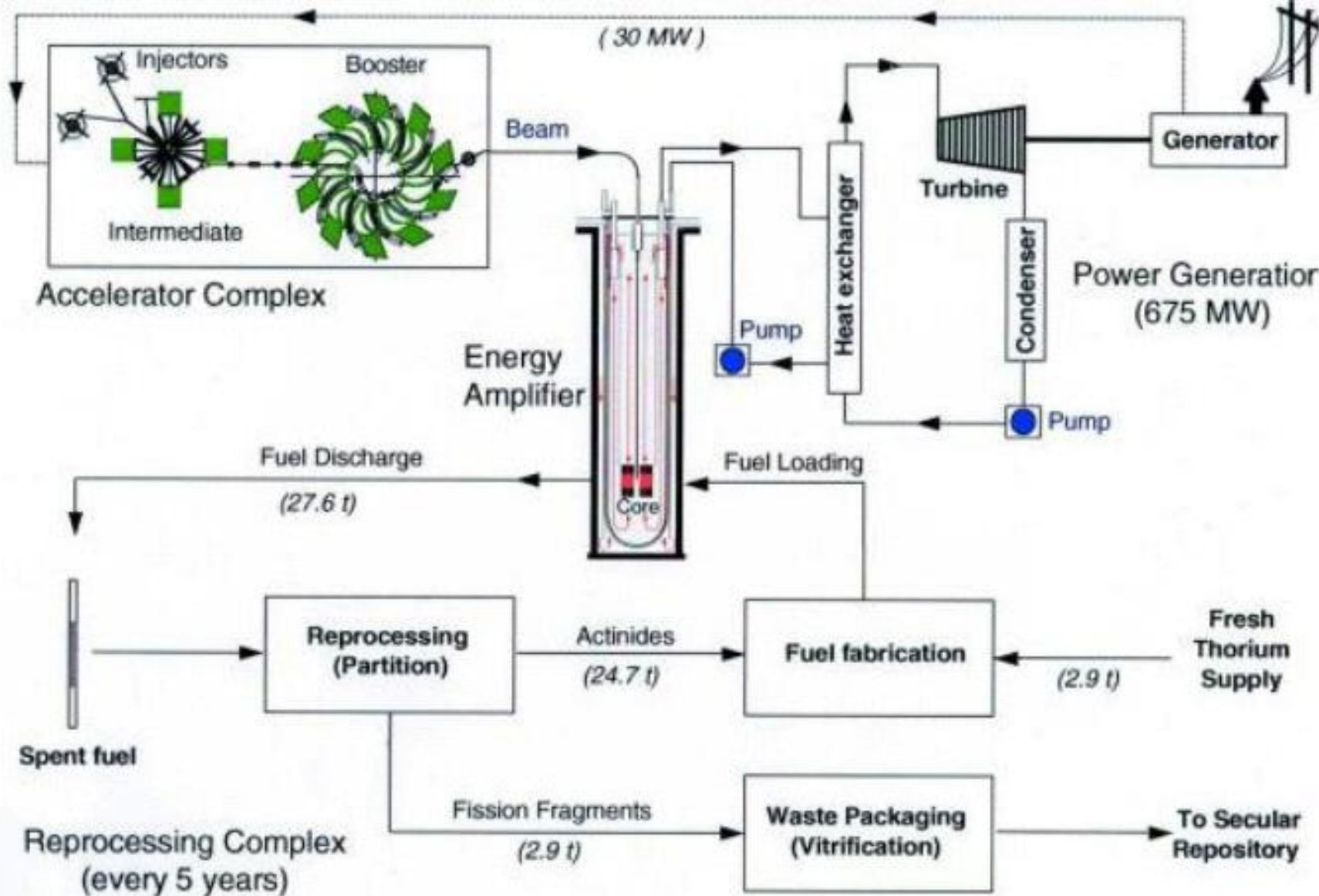
- ・ウラン資源: 低品位のものしか発見されておらず、確認資源量は約5.2万t。
- ・トリウム資源: 約36万t。

<原子力政策>

国産のトリウム資源を利用する「トリウム・サイクル」の確立を目指して次の3段階からなる。

- ①天然ウランを燃料として加圧重水炉(PHWR)で発電し、使用済燃料を再処理してプルトニウムを生産。
- ②プルトニウムを燃料として高速増殖炉(FBR)で発電するとともに、ウラン238とトリウム232を照射、再処理してプルトニウム239とウラン233を生産。
- ③ウラン233を燃料として高速増殖炉(FBR)で発電するとともに、トリウム232を照射、再処理してウラン233を生産。(トリウム・サイクル)

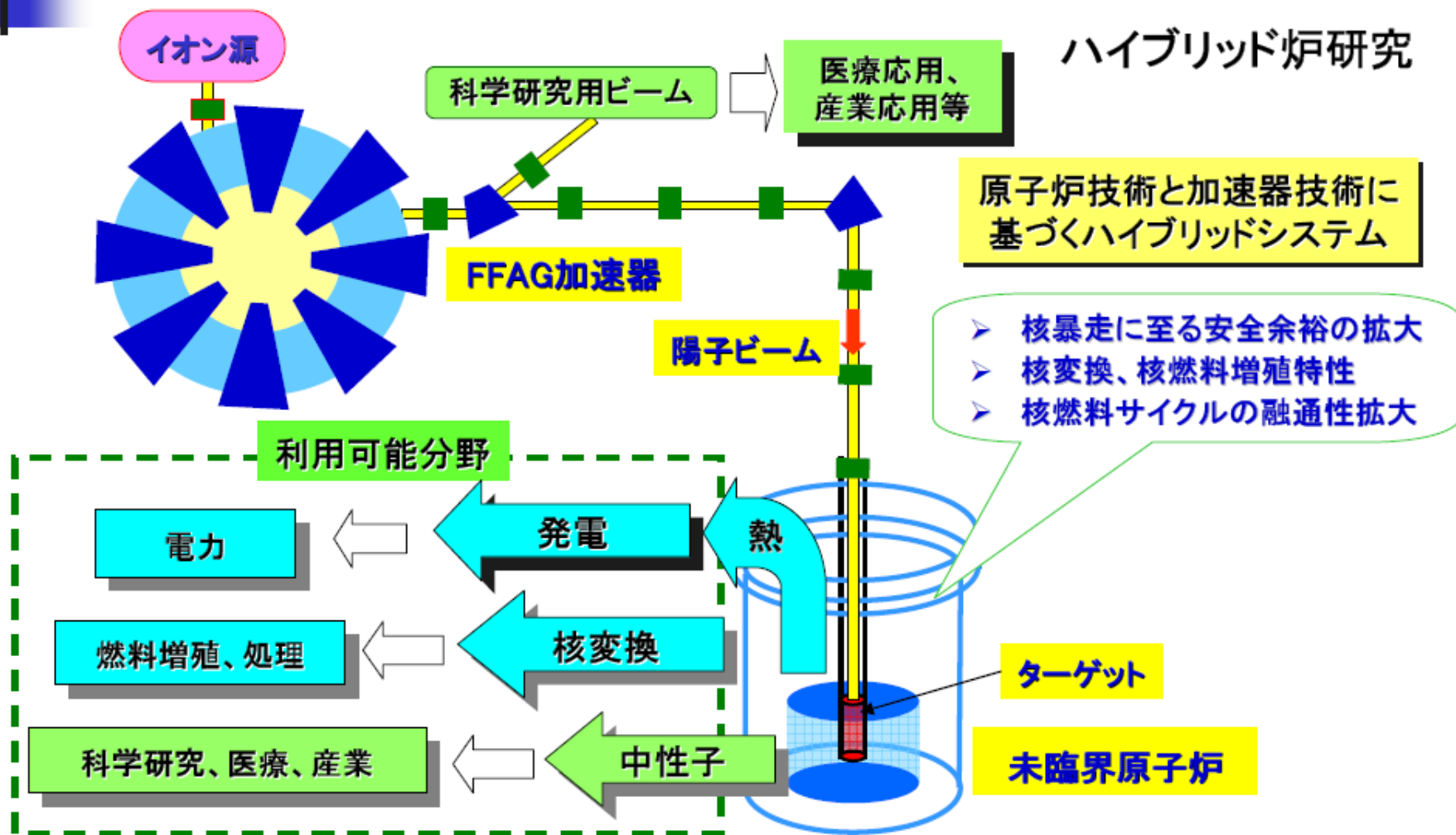




革新的原子力安全システムの一例
(加速器駆動未臨界炉)

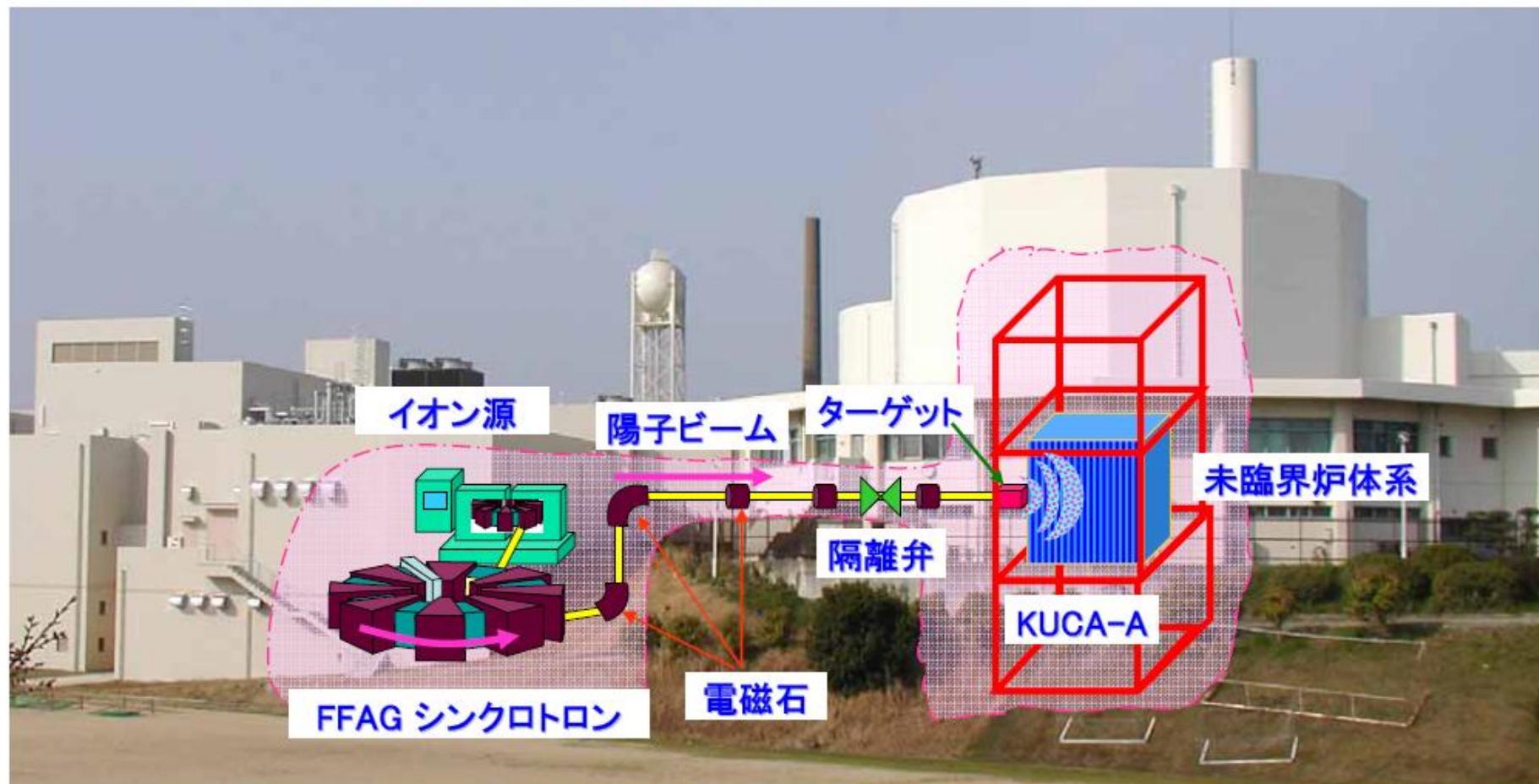
京都大学原子炉実験所における取り組みー10

ハイブリッド炉研究



京都大学原子炉実験所における取り組み-5

世界初の加速器駆動未臨界炉実験: SCIENCE Vol.302 17 Oct. 2003 – News Focus

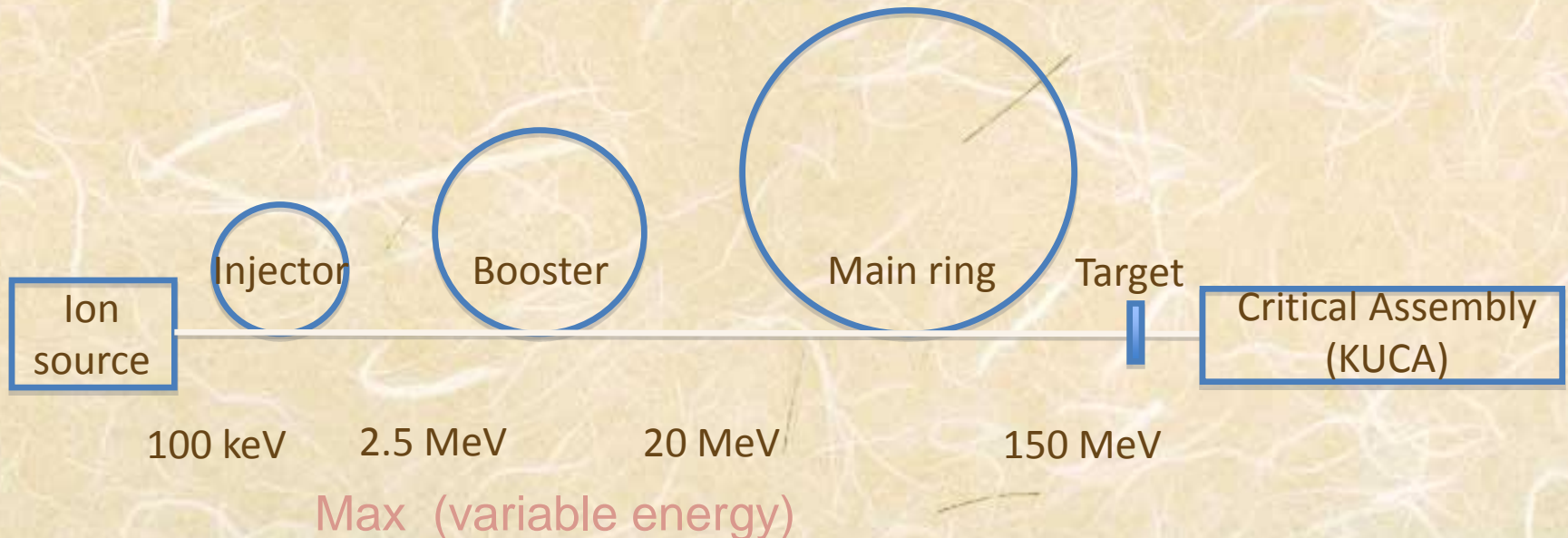


FFAG-ADS Project

To study

Accelerator Driven Sub-critical Reactor (ADS)

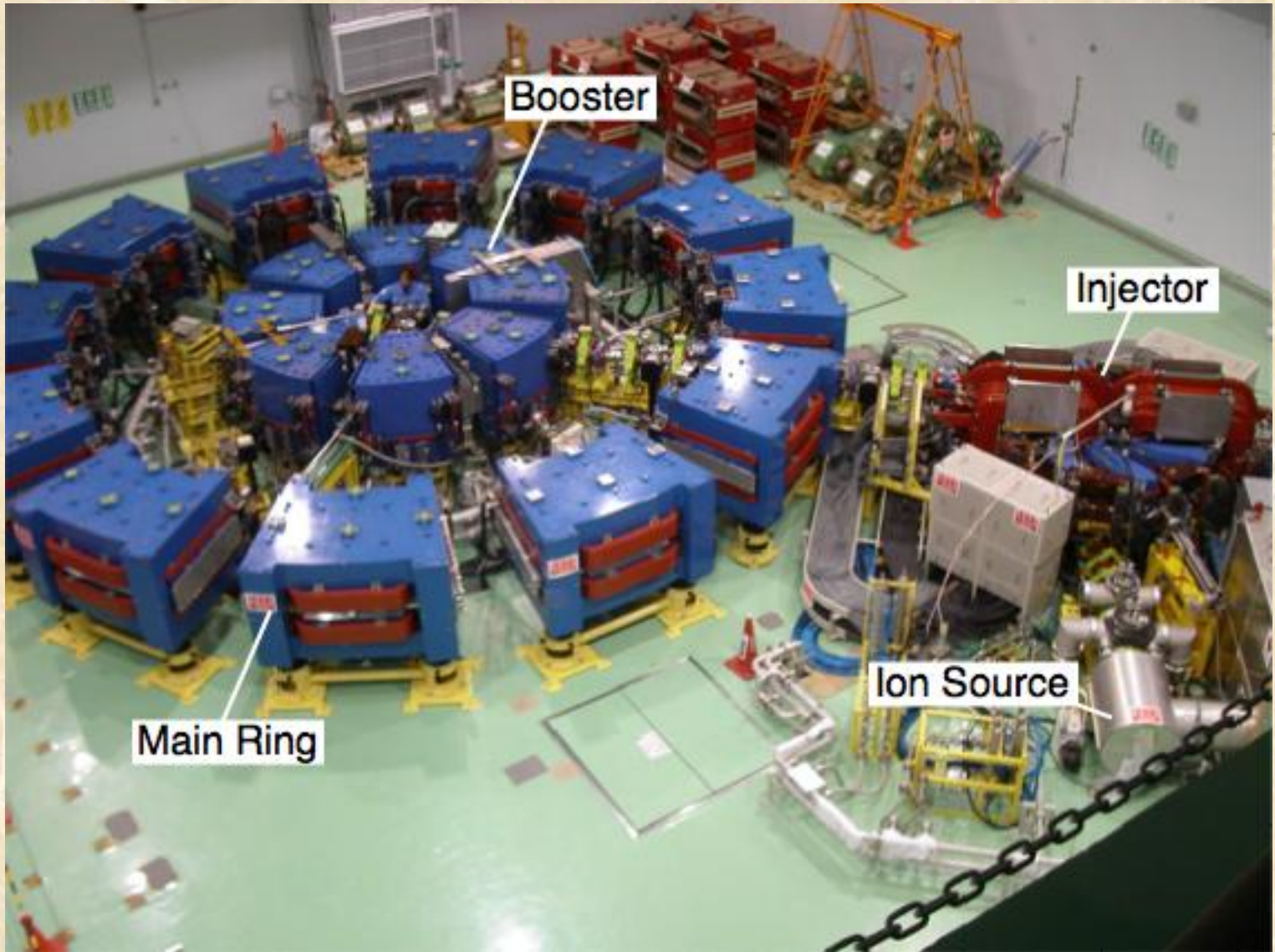
- Narrow energy spectrum of n beam
- Energy and Flux of the n beam can be easily controlled.



Accelerators for ADS

	Injector	Booster	Main Ring
Focusing	Spiral, 8 cells	Radial, 8 cells	Radial, 12 cells
Acceleration	Induction	RF	RF
Field index, k	2.5*	4.5	7.5
Energy (max)	0.1-2.5 MeV*	2.5-20 MeV	20-150 MeV
P_{ext}/P_{inj}	5.00(Max)	2.84	2.83
Average orbit radii	0.60 - 0.99 m	1.42 - 1.71 m	4.54 - 5.12 m

* Output energy of the injector is variable



Booster

Injector

Main Ring

Ion Source

Injector

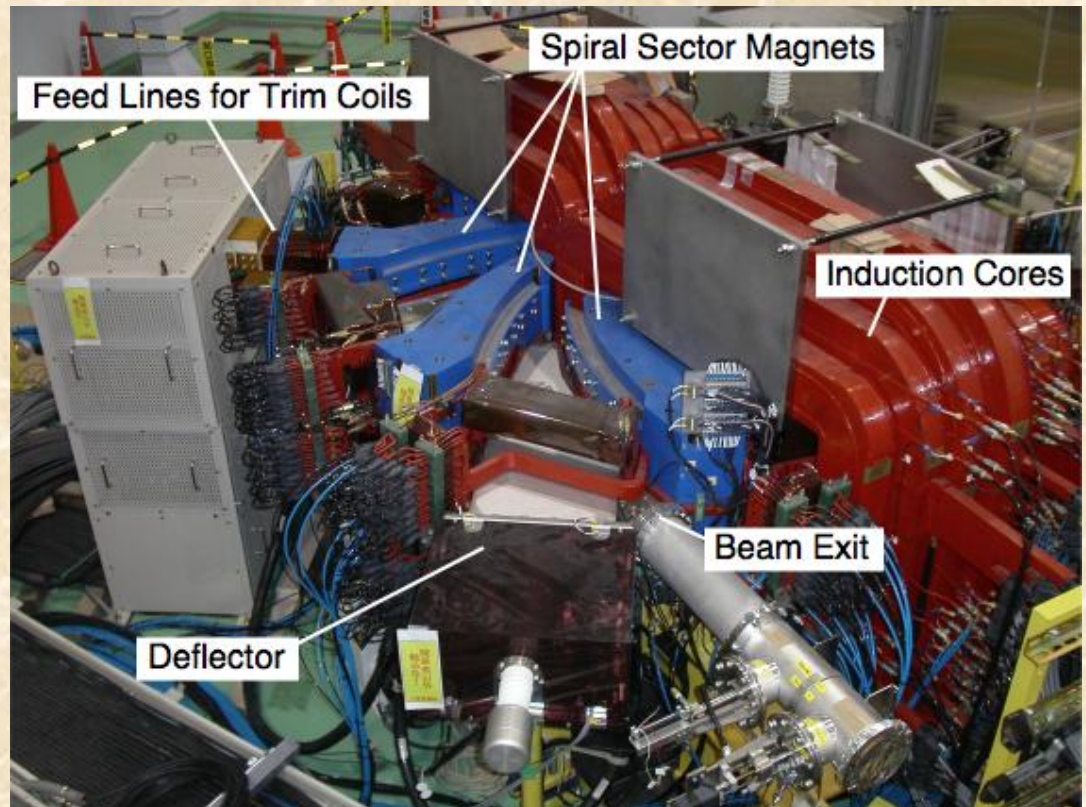
Spiral sector magnets
spiral angle = 42 deg

Induction acceleration
500 V/turn

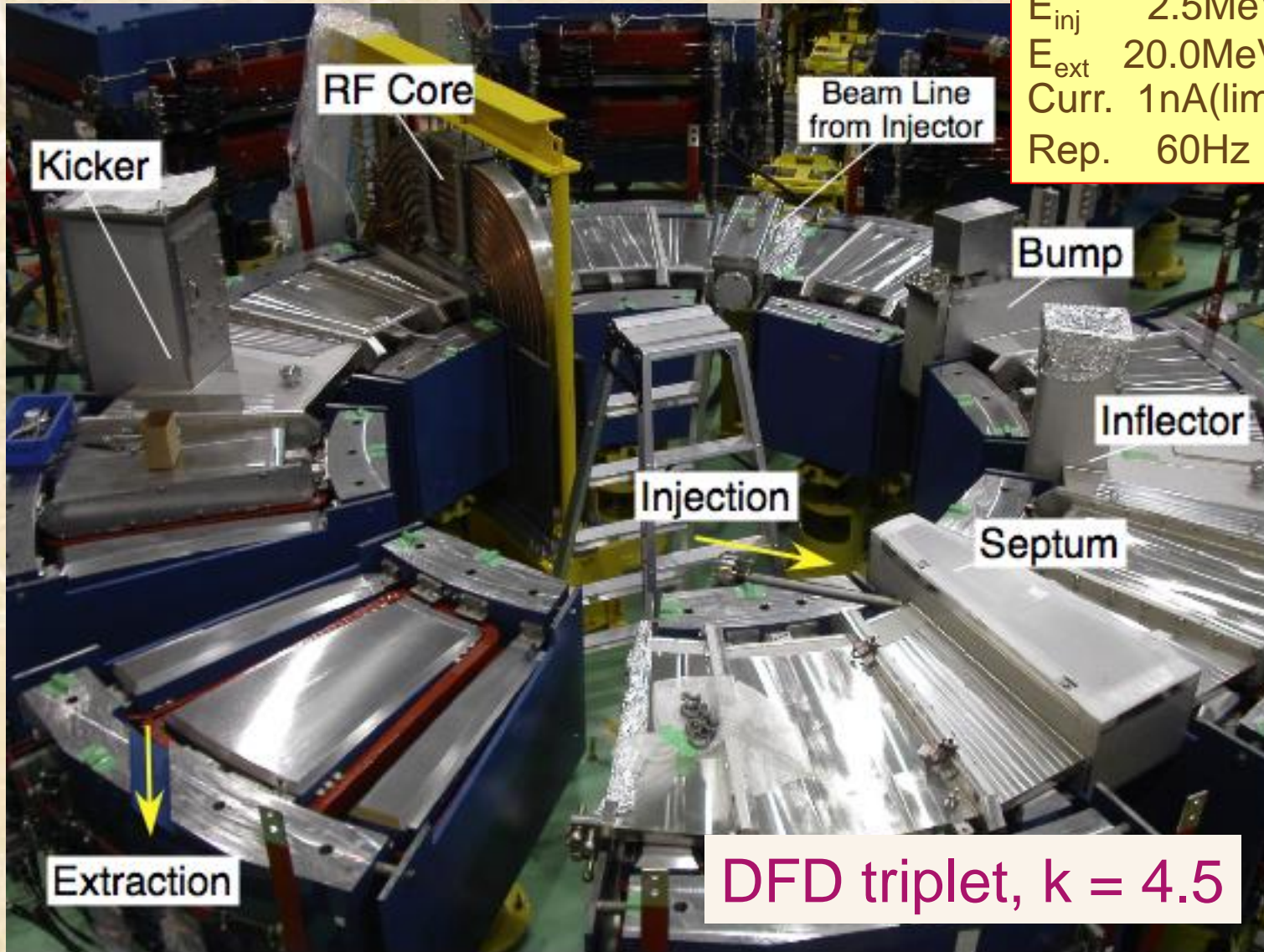
Variable field-index k ,
by means of trim-coils



	Design	Achieved
E_{inj}	0.1MeV	0.12MeV
E_{ext}	2.5MeV	1.5MeV
Curr.	10nA(lim)	10nA
Rep.	120 Hz	118 Hz



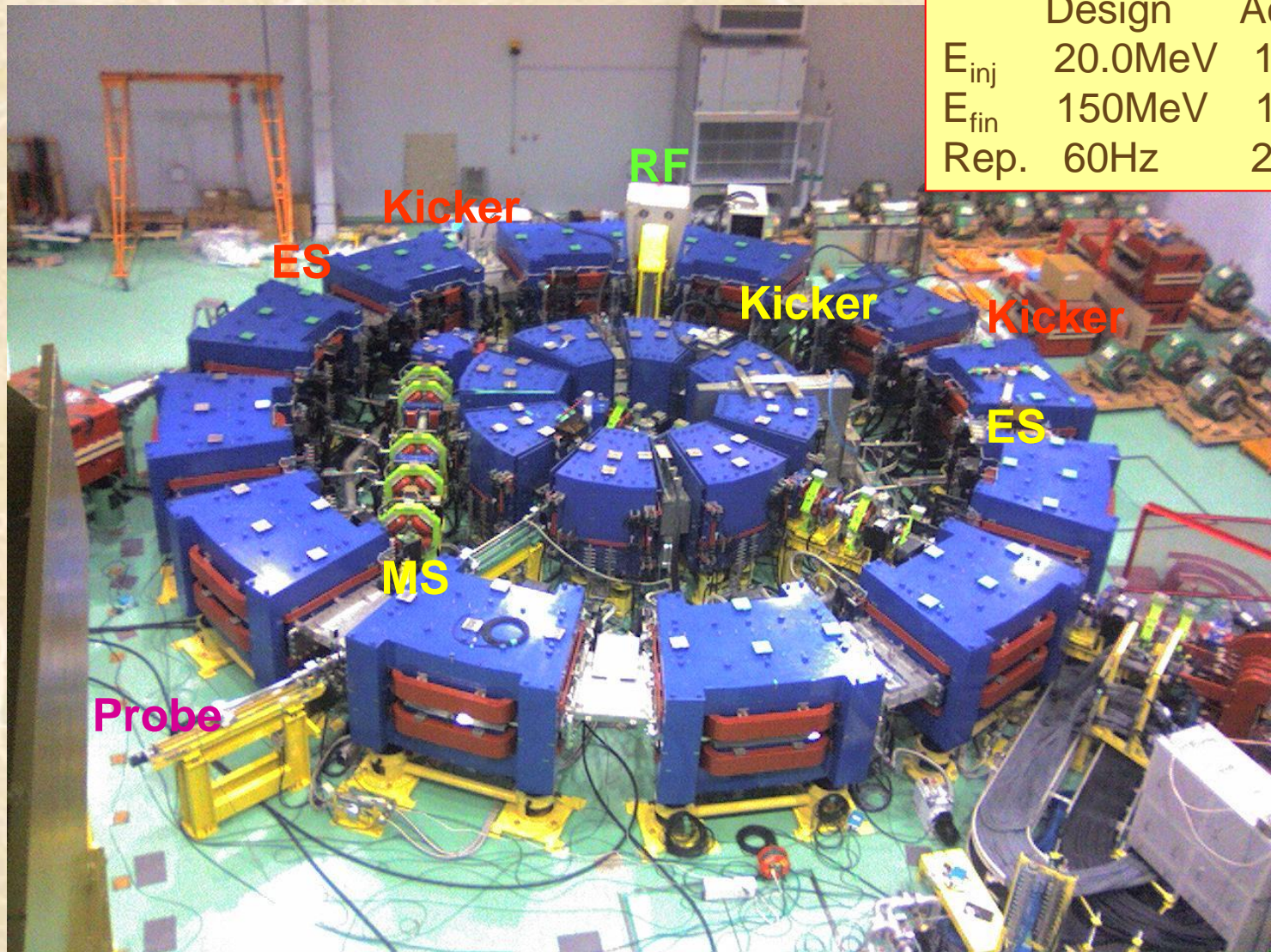
Booster



	Design	Achieved
E_{inj}	2.5MeV	1.5MeV
E_{ext}	20.0MeV	11.6MeV
Curr.	1nA(lim)	1nA
Rep.	60Hz	59 Hz

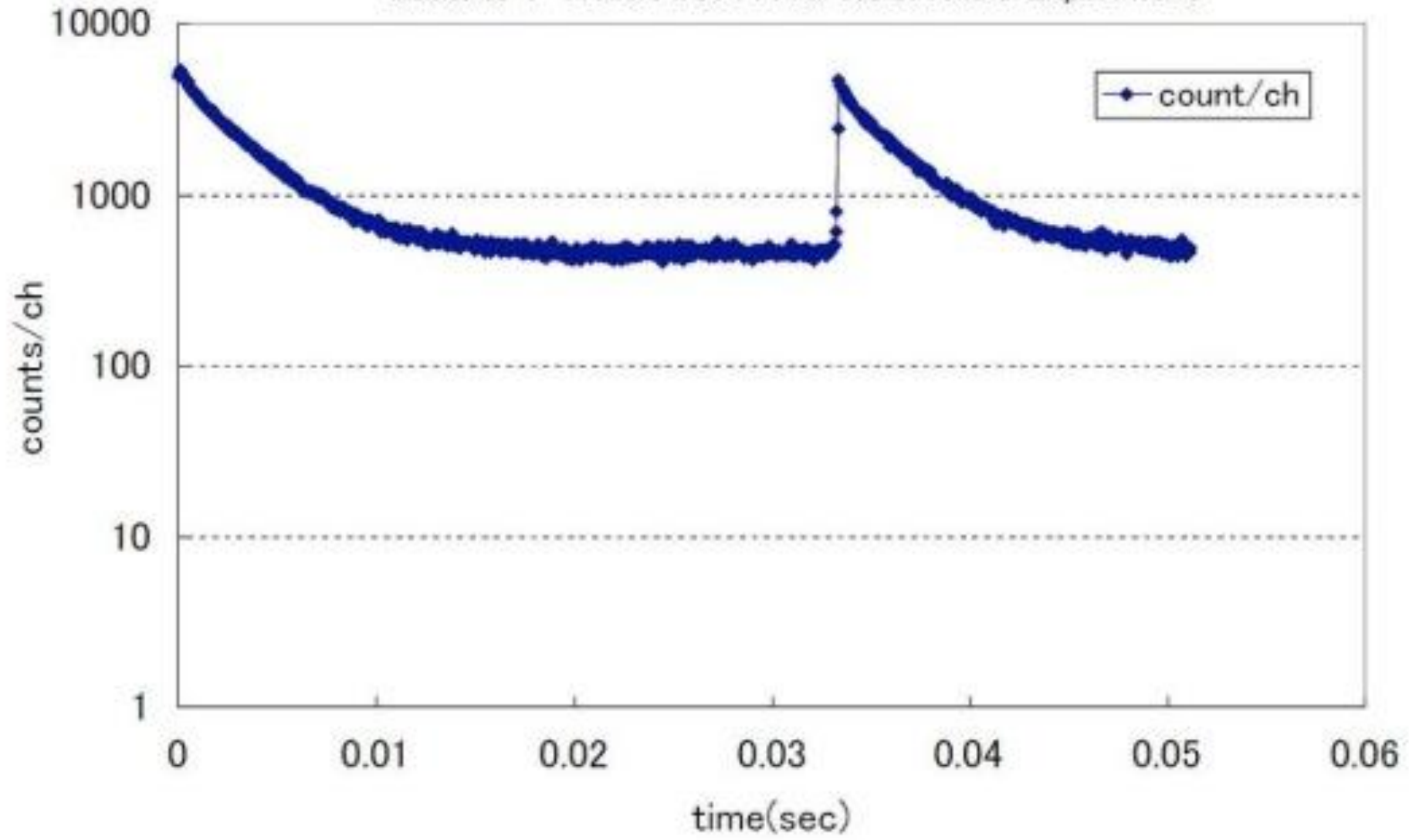
DFD triplet, $k = 4.5$

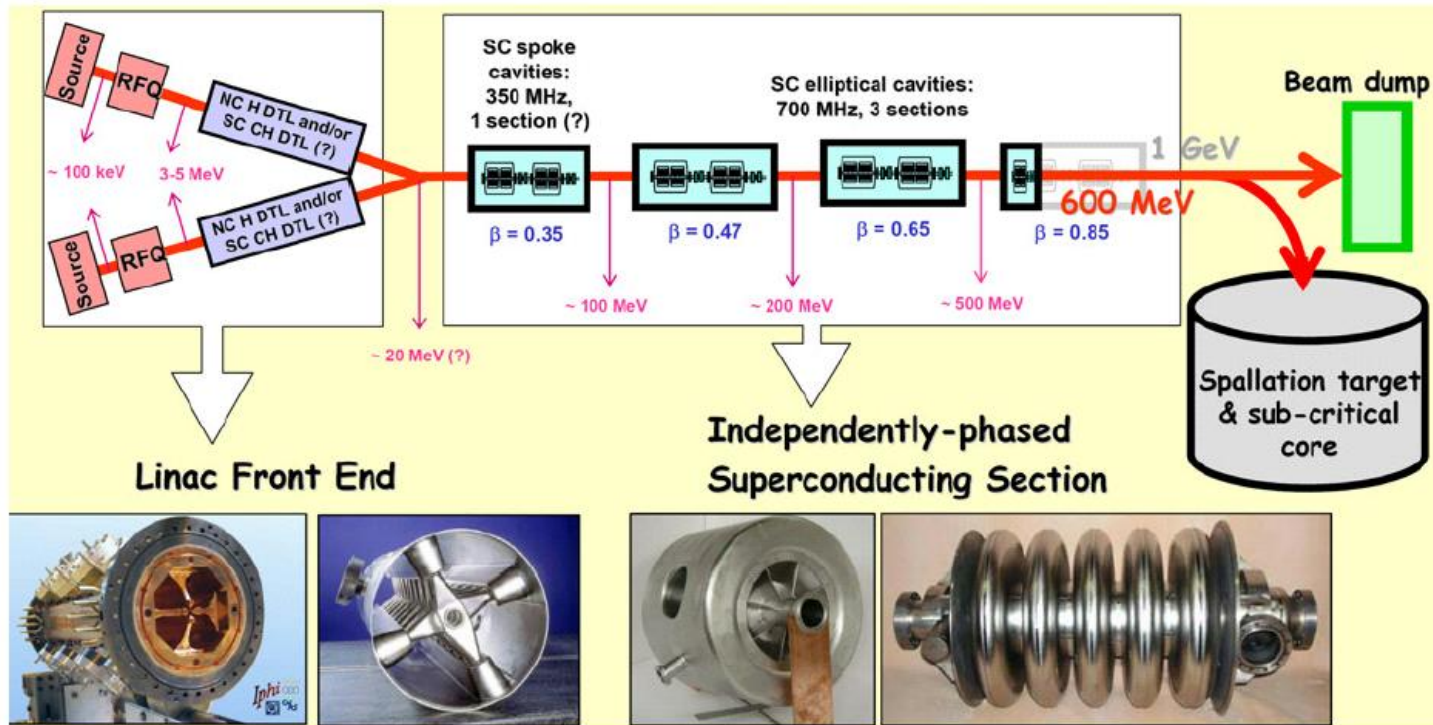
Main Ring



	Design	Achieved
E_{inj}	20.0MeV	11.6MeV
E_{fin}	150MeV	100MeV
Rep.	60Hz	29.5Hz

2009/3/4 17:29 First FFAG-KUCA ADS Experiment





ヨーロッパ
 の計画例

Figure 1: European ADS accelerator conceptual scheme.

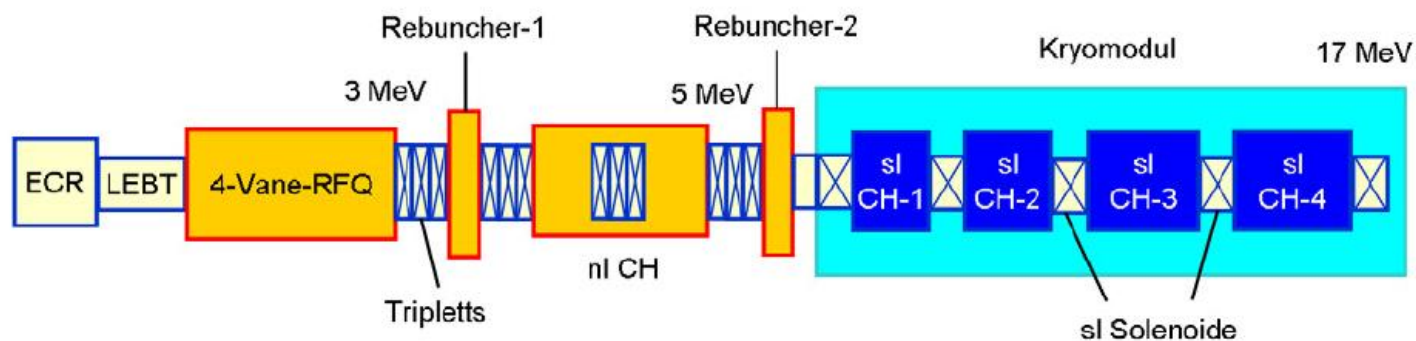


Figure 2: The reference linac front-end.

中性子発生量の計算

例

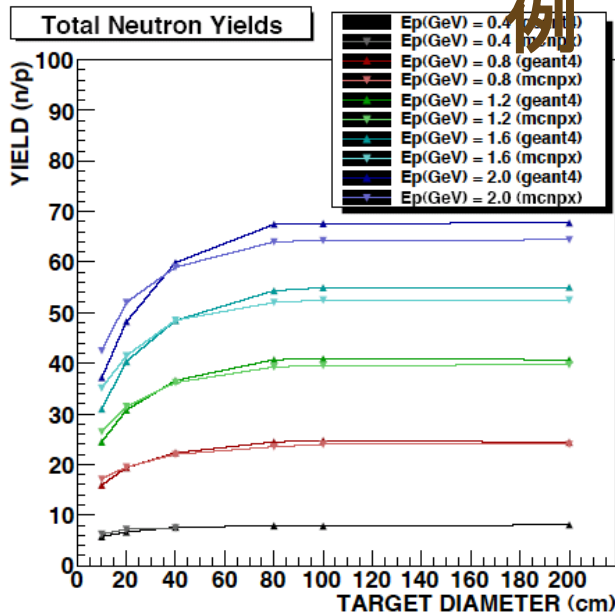


Figure 3: The variation of the total neutron yield with the target diameter for different proton energies (GEANT4 vs MCNPX).

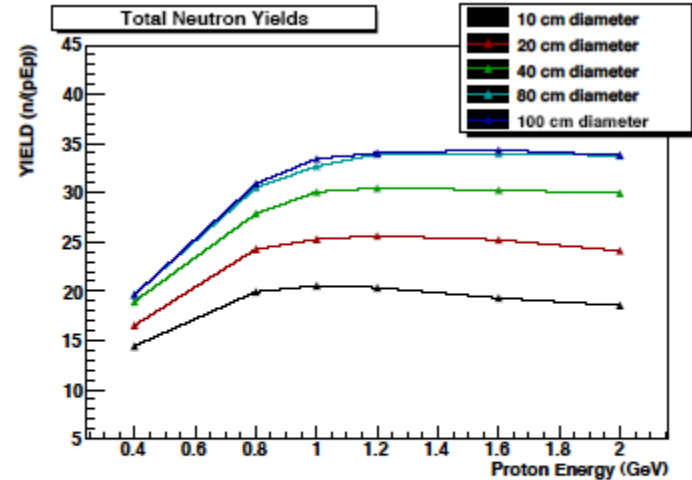


Figure 8: The total number of neutrons escaping from the target per unit of proton energy (GEANT4).

NEUTRON SPALLATION STUDIES FOR AN ACCELERATOR DRIVEN SUBCRITICAL REACTOR

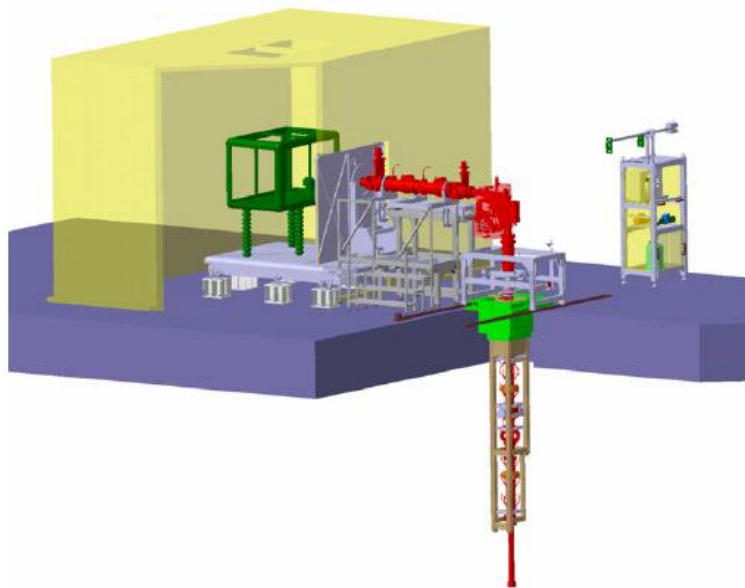


Figure 1: General layout of the GENEPI-3C machine.



Figure 6: Accelerator GENEPI-3C assembled at LPSC (March 09).

Table 1: Characteristics in pulsed and continuous mode.

Parameters	Values
Energy	140 up to 240 keV (deuterons)
Pulsed mode	Peak current: 40 mA on target pulse duration (FWHM) < 1 μ s Repetition rate up to 5 kHz
Continuous mode	DC current: 1 mA on target Beam interruptions: 20 μ s to 10 ms Beam trip rate: 0.1 to 100 Hz Rise/drop times: \sim 1 μ s
Beam diameter	\sim 20 mm on target
Stability	\sim 1%
Beam power	240 W on target (continuous mode)

ADS研究用小型装置 ヨーロッパの計画

GENEPI-3C is a neutron generator for ADS purposes.

It will be installed at Mol (Belgium) after commissioning at Grenoble (FRANCE).

Table 1: European Transmuter Main Specifications

Transmuter demo (XT-ADS / MYRRHA project)	Industrial transmuter (EFIT)
50 – 100 MWth power	Several 100 MWth power
k_{eff} value ~ 0.95	k_{eff} value ~ 0.97
Highly-enriched MOX fuel	Minor Actinide fuel
Pb-Bi Eutectic coolant & target	Pb coolant & target

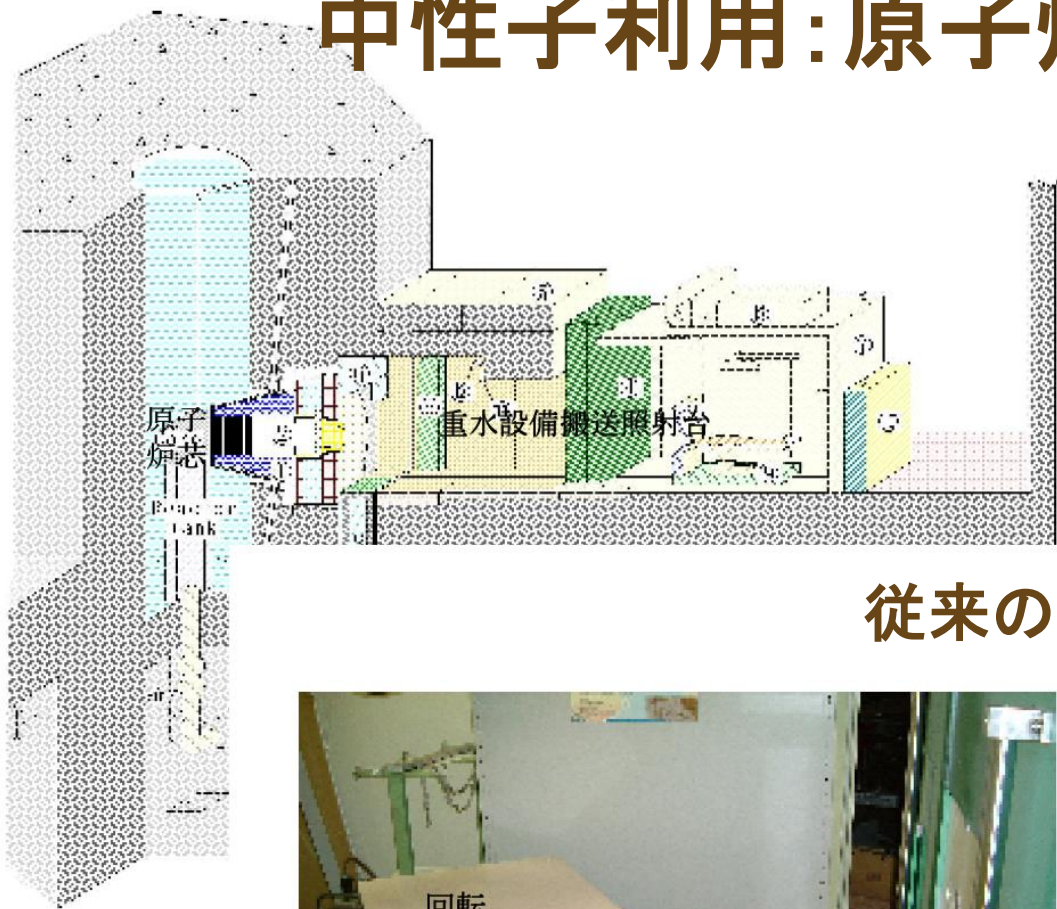
Table 3: Independently-Phased Linac Overview

SC cavity type	#Cav. #Cryom.	Energy range	Section length
352 MHz 2-gap $\beta 0.35$ Spoke	60 cav 20 cryo	17 ~ 90 MeV	~ 50 m
704 MHz 5-cell $\beta 0.50$ Elliptical	30 cav 15 cryo	90 ~ 190 MeV	~ 60 m
704 MHz 5-cell $\beta 0.65$ Elliptical	42 cav 14 cryo	190 ~ 450 MeV	~ 80 m
704 MHz 6-cell $\beta 0.85$ Elliptical	16 cav 4 cryo	450 ~ 600 MeV	~ 35 m

Table 2: Proton Beam General Specifications

	Transmuter demo (XT-ADS / MYRRHA project)	Industrial transmuter (EFIT)
Proton beam current	2.5 mA (& up to 4 mA for burn-up compensation)	~ 20 mA
Proton energy	600 MeV	~ 800 MeV
Allowed beam trips (> 1 sec) number	$\sim < 5$ per 3-month operation cycle	$\sim < 3$ per year
Beam entry into the reactor	Vertically from above	
Beam stability on target	Energy: $\pm 1\%$ - Current: $\pm 2\%$ - Position & Size: $\pm 10\%$	
Beam time structure	CW (w/ low-frequency 200 μ s zero-current beam holes for sub-criticality monitoring)	

中性子利用：原子炉から加速器へ

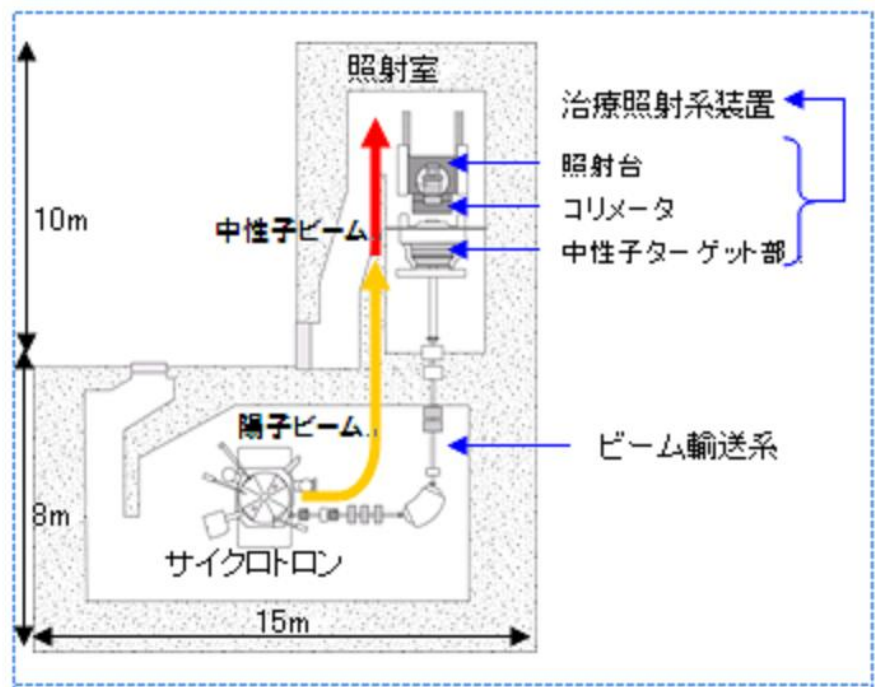
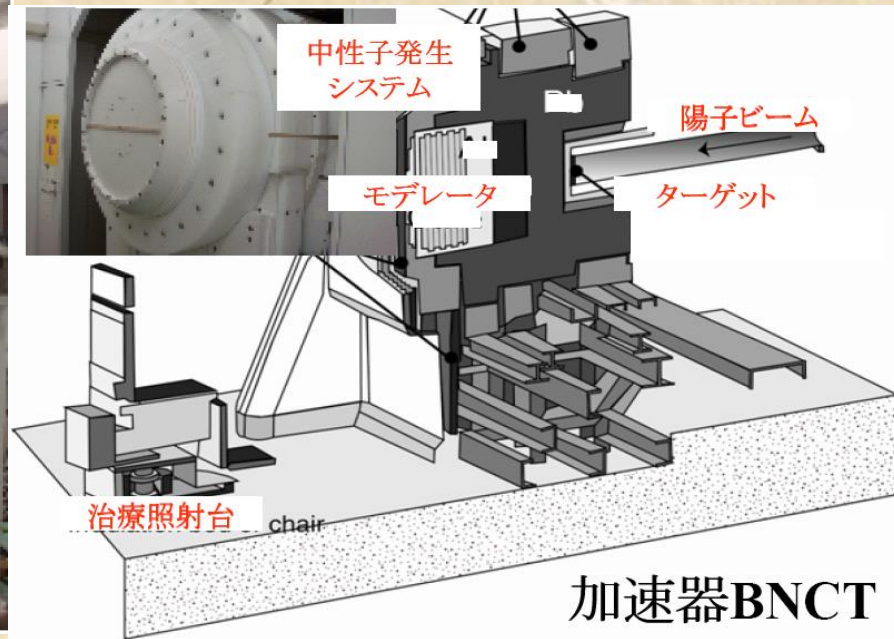


従来の原子炉中性子によるがん治療



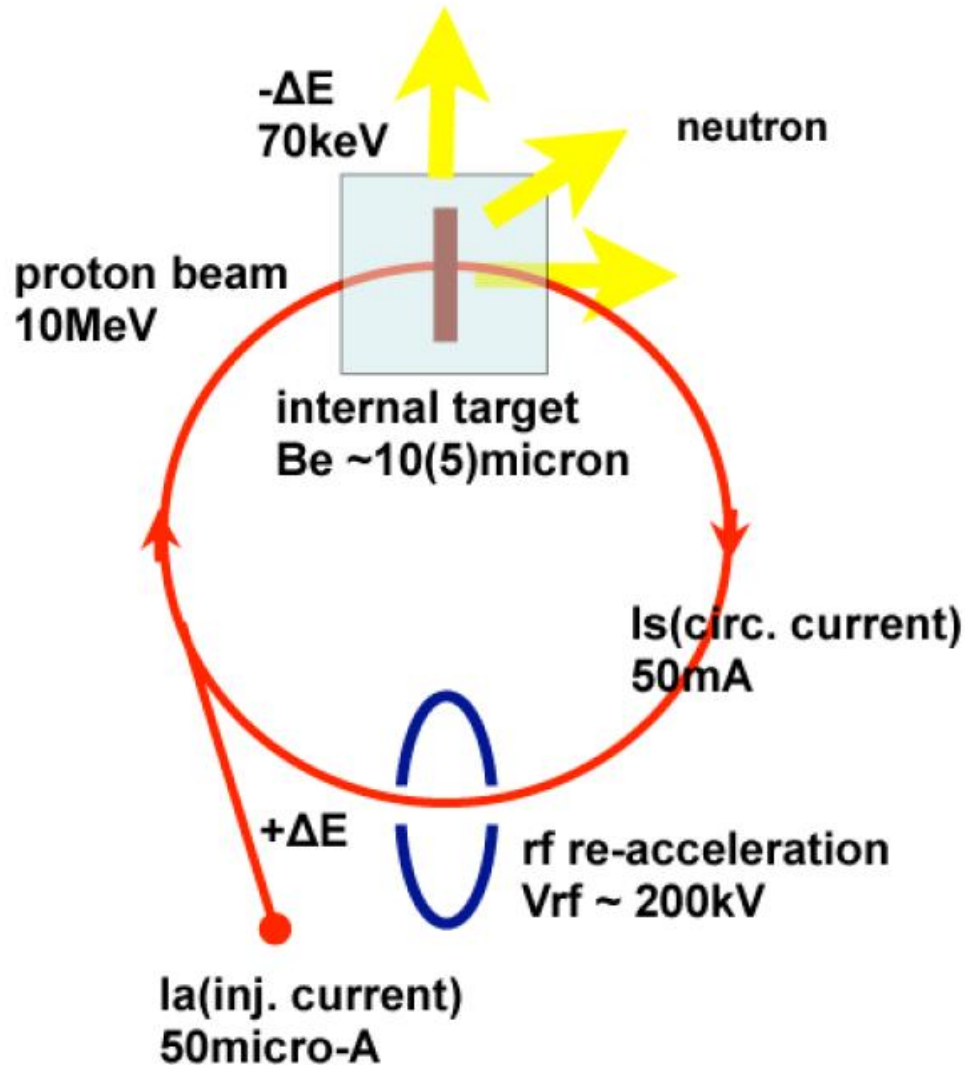
速→熱外 (X,Y,Z)
中性子EP変換機

原子炉BNCT



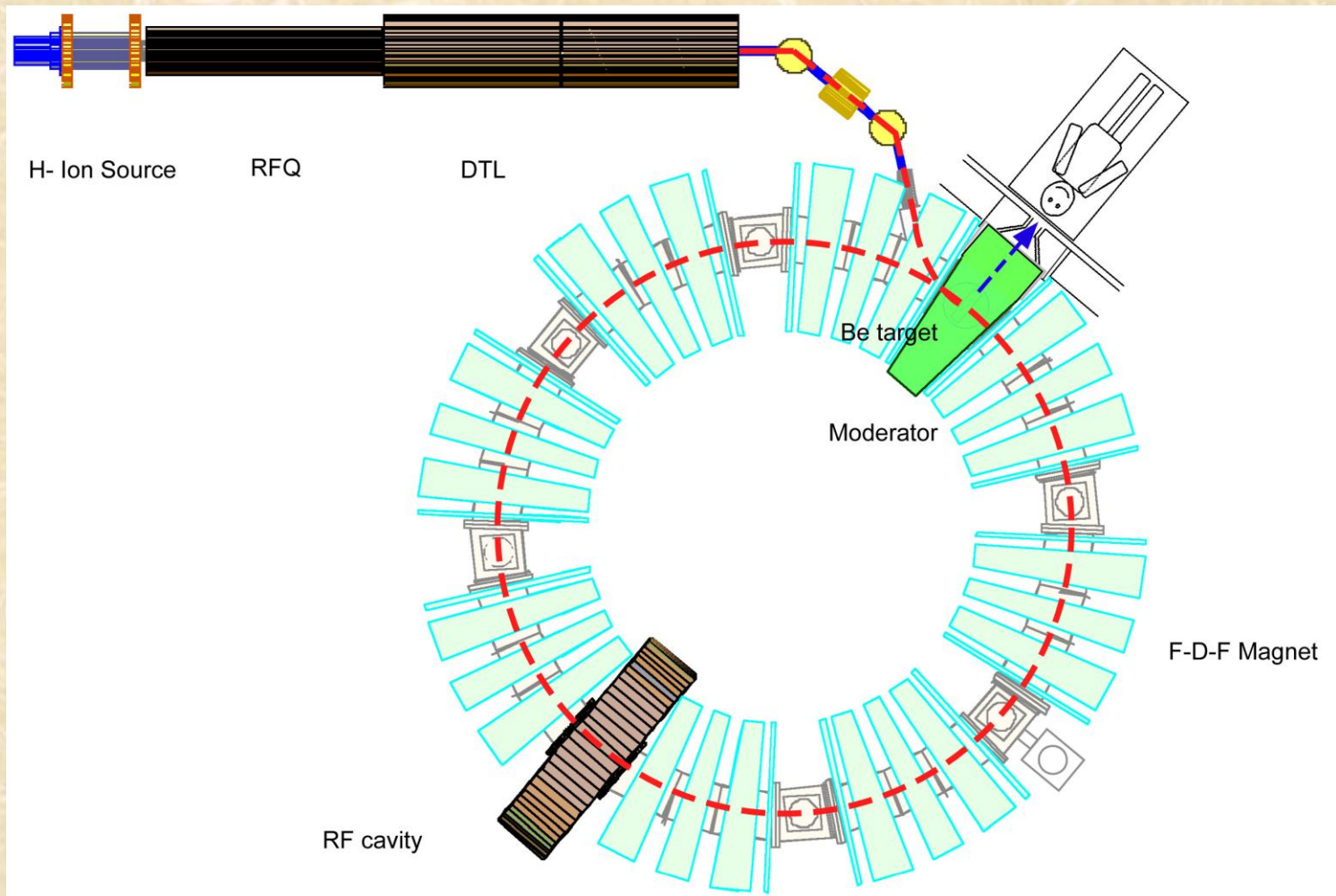
京大原子炉実験所で行われているサイクロトロンによるBNCT施設

もう一つにより革新的なBNCT用加速器開発」研究の例



FFAG-ERIT

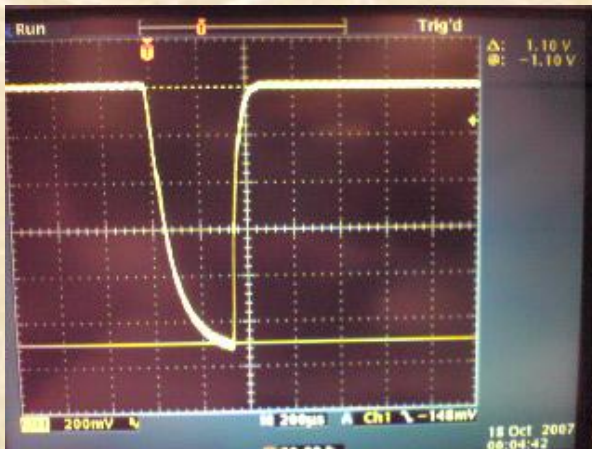
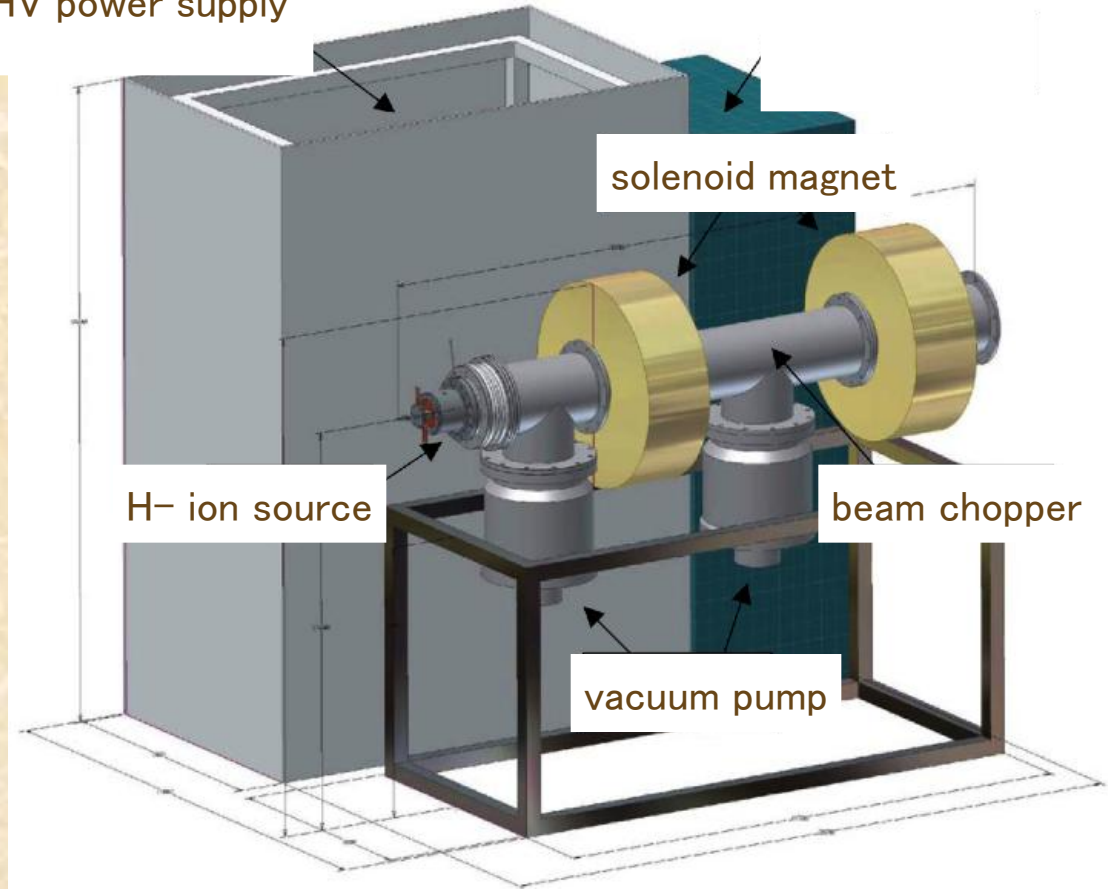
Schematic layout of FFAG-ERIT



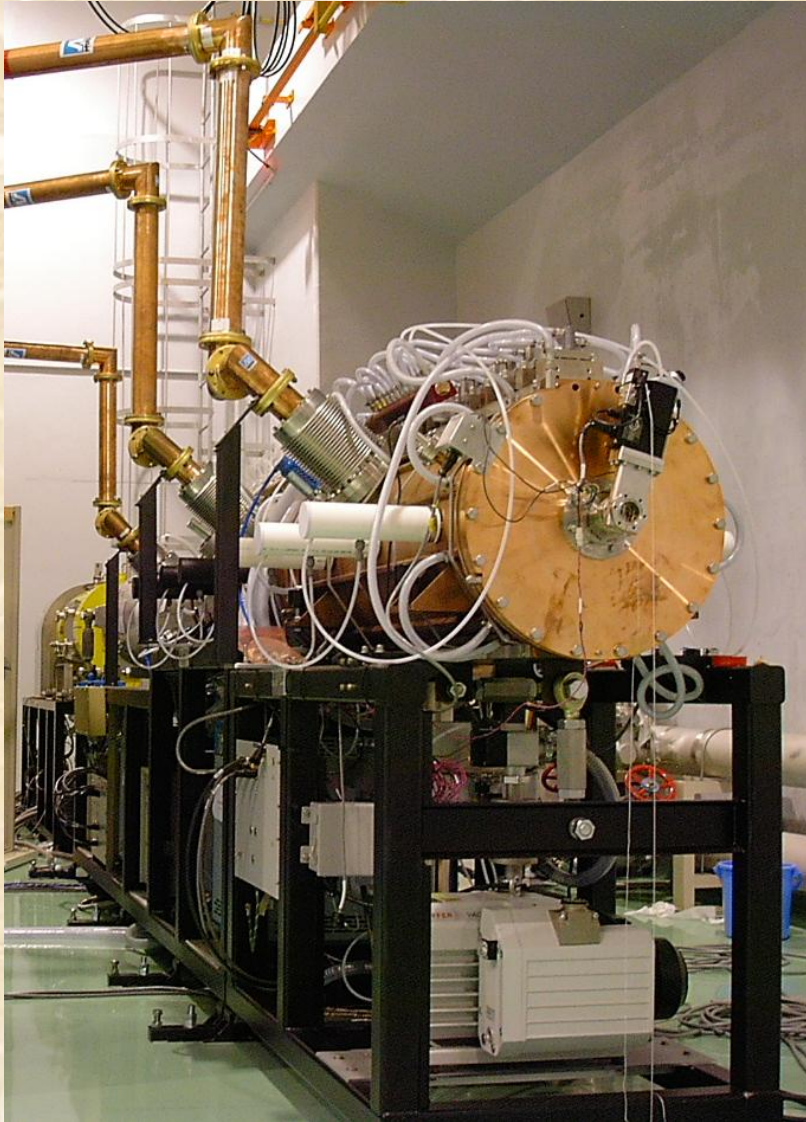
Ion source

- particle: negative hydrogen
- extraction energy: 30 keV
- rep. rate: 200Hz (goal: 500Hz)
- beam duration: 2%, maximum
- beam current:
 - 100 μ A (ave.)
 - 1-5mA (peak)
- nor. emittance: $<1\pi$ mm-mrad

HV power supply



LINAC (RFQ/DTL)



- Ion species H^-
- Injection energy 30keV
- Extruction energy 11MeV
- beam current $>100\mu A$
- rf duty(tube) $\sim 2\%$
- Rep. rate 20-200Hz



Figure 2: Photograph of FFAG-ERIT ring.

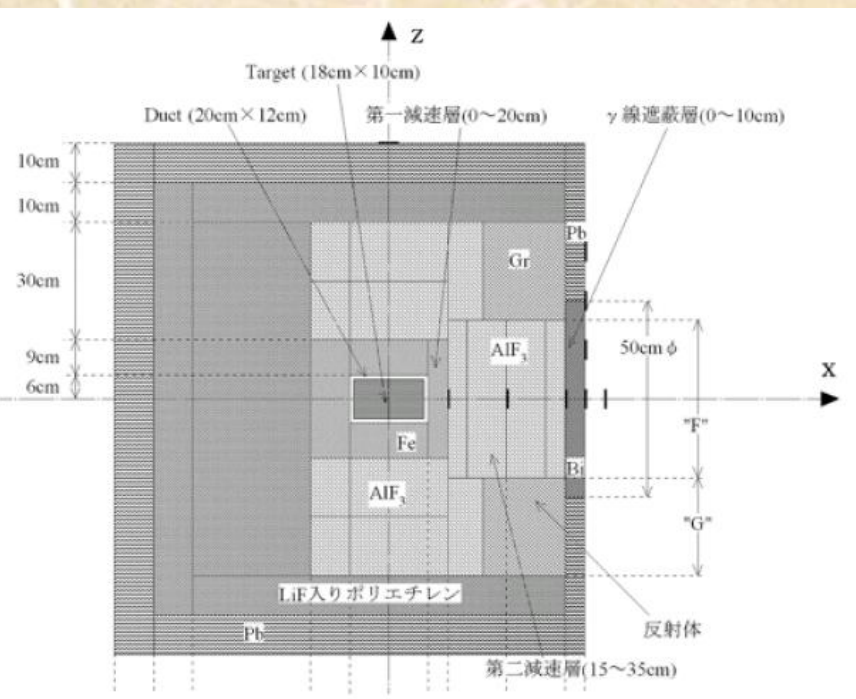


Figure 3: Schematic configuration of neutron moderator.

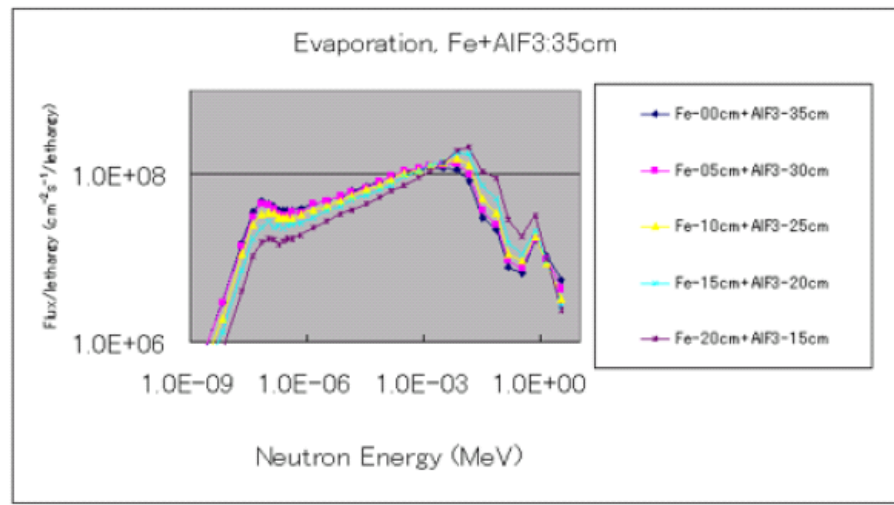


Figure 4: Neutron yield and spectrum simulated by MCNP/PHITS.

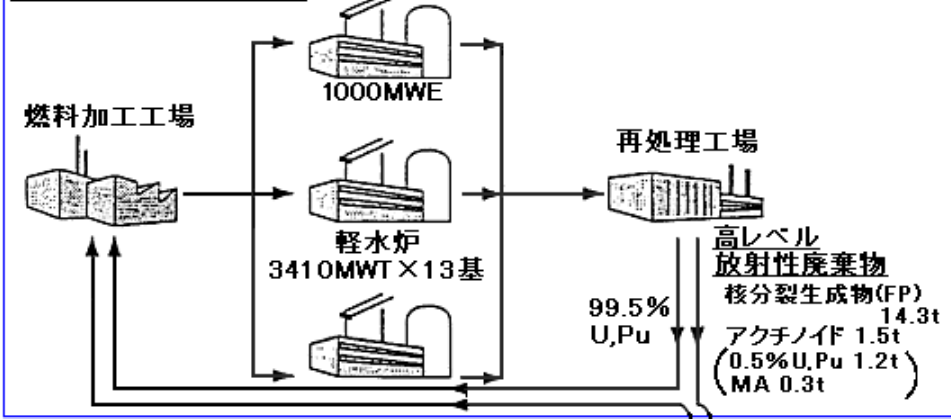
FFAG/ERIT 中性子源

使用済燃料の処理処分

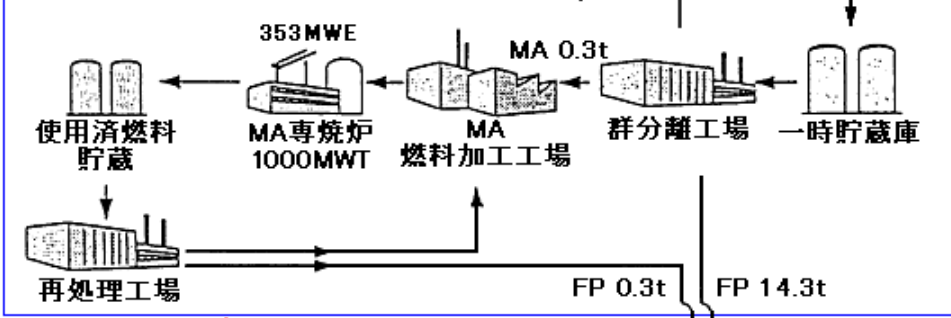
ワンスルー

分離変換処理(高速炉、加速器駆動システム)

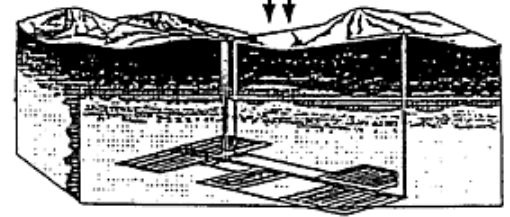
第一階層燃料サイクル



第二階層燃料サイクル
(群分離・消滅処理サイクル)



MA: マイナーアクチノイド

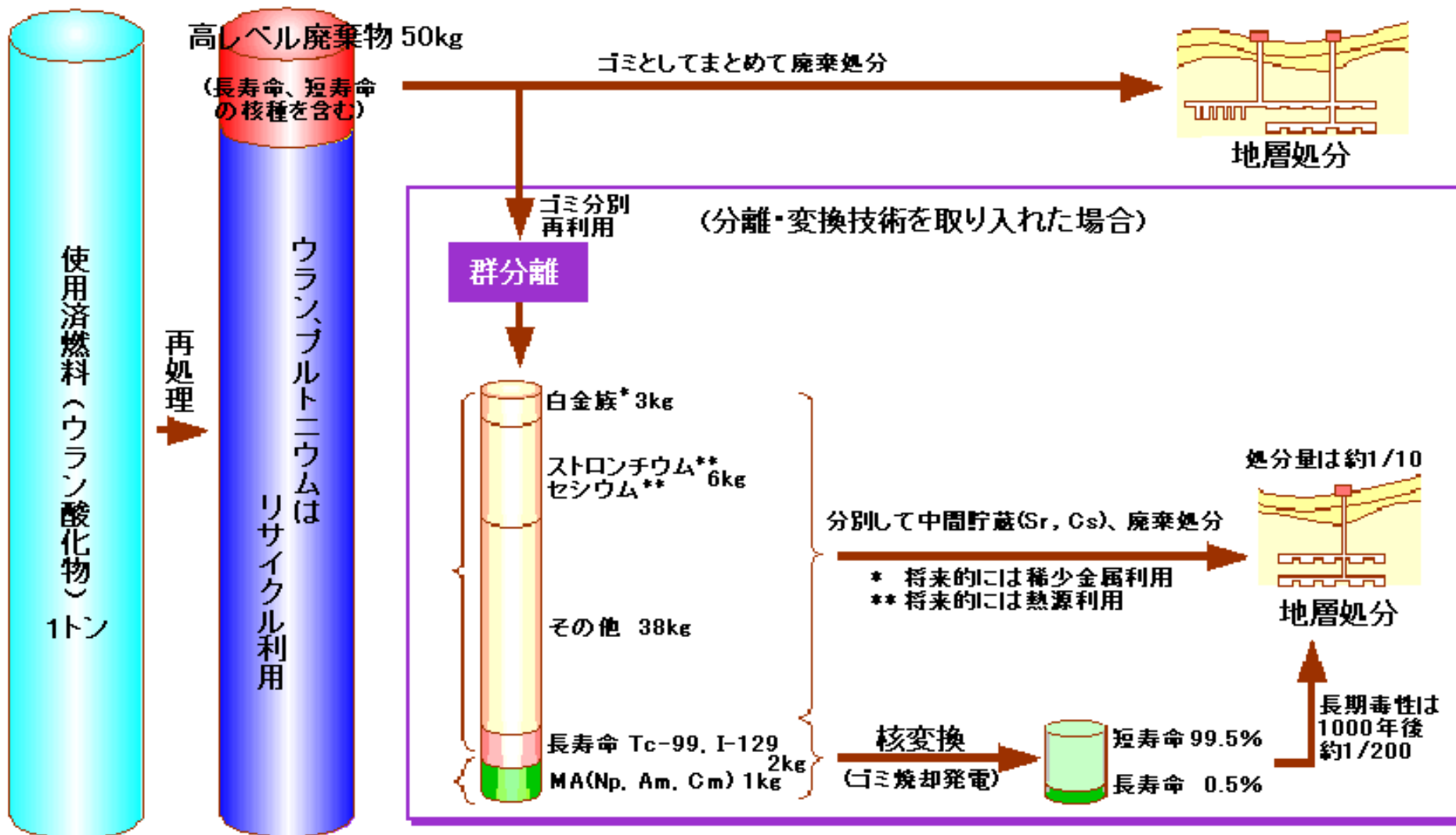


最終処分場 1000年以下

第一サイクルは通常の燃料サイクルであり、このサイクルで発生する高レベル放射性廃棄物を第二サイクルにおいて群分離・消滅処理する。この結果、階層燃料サイクルを経て出てくる高レベル放射性廃棄物は長半減期のマイナーアクチノイドを含まない核分裂生成物のみとなる。

図4 階層型核燃料サイクル概念

[出典] 向山 武彦: 長半減期放射性廃棄物の消滅処理, エネルギーレビュー, 14 (2), 8(1994)

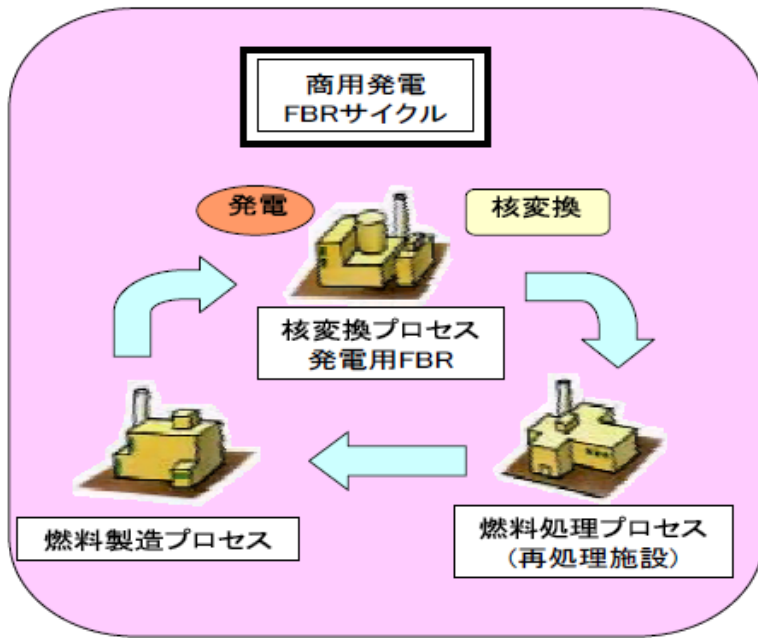


長寿命核種: 1~1000万年程度で放射能消滅する。 短寿命核種: 1000年程度で放射能消滅する。

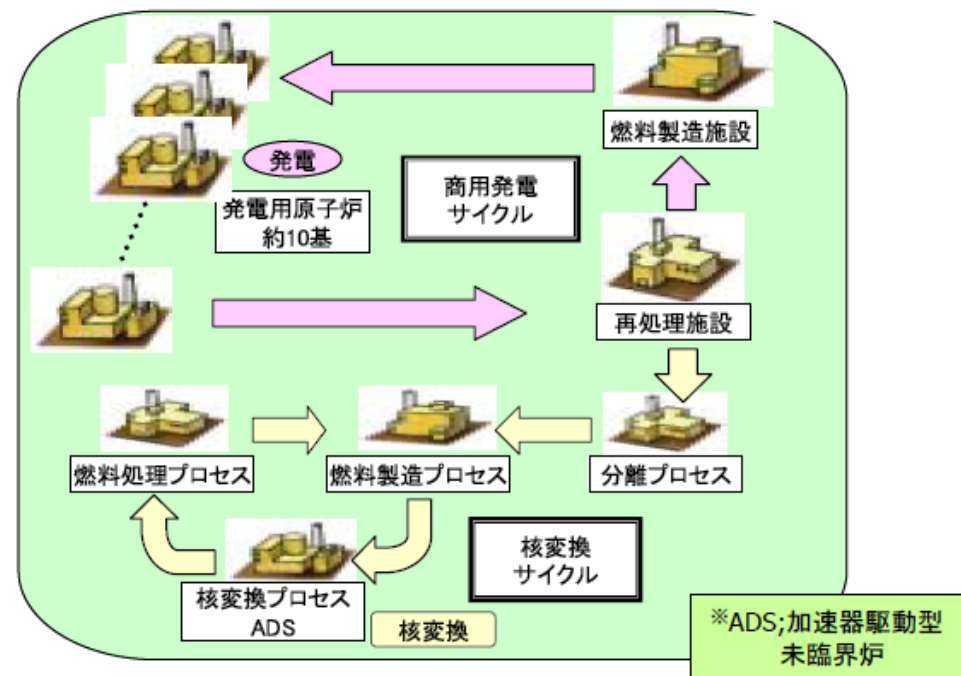
図1 高レベル廃棄物の分離核変換技術とは

[出典] 高野 秀機: 加速器駆動炉核変換における核データ、連載講座 核データ③ 核データの測定と応用、日本原子力学会誌、Vol.43、No.7、p.659(2001)。

高速炉(FBR)サイクル利用型



階層型(商用炉+ADS※)



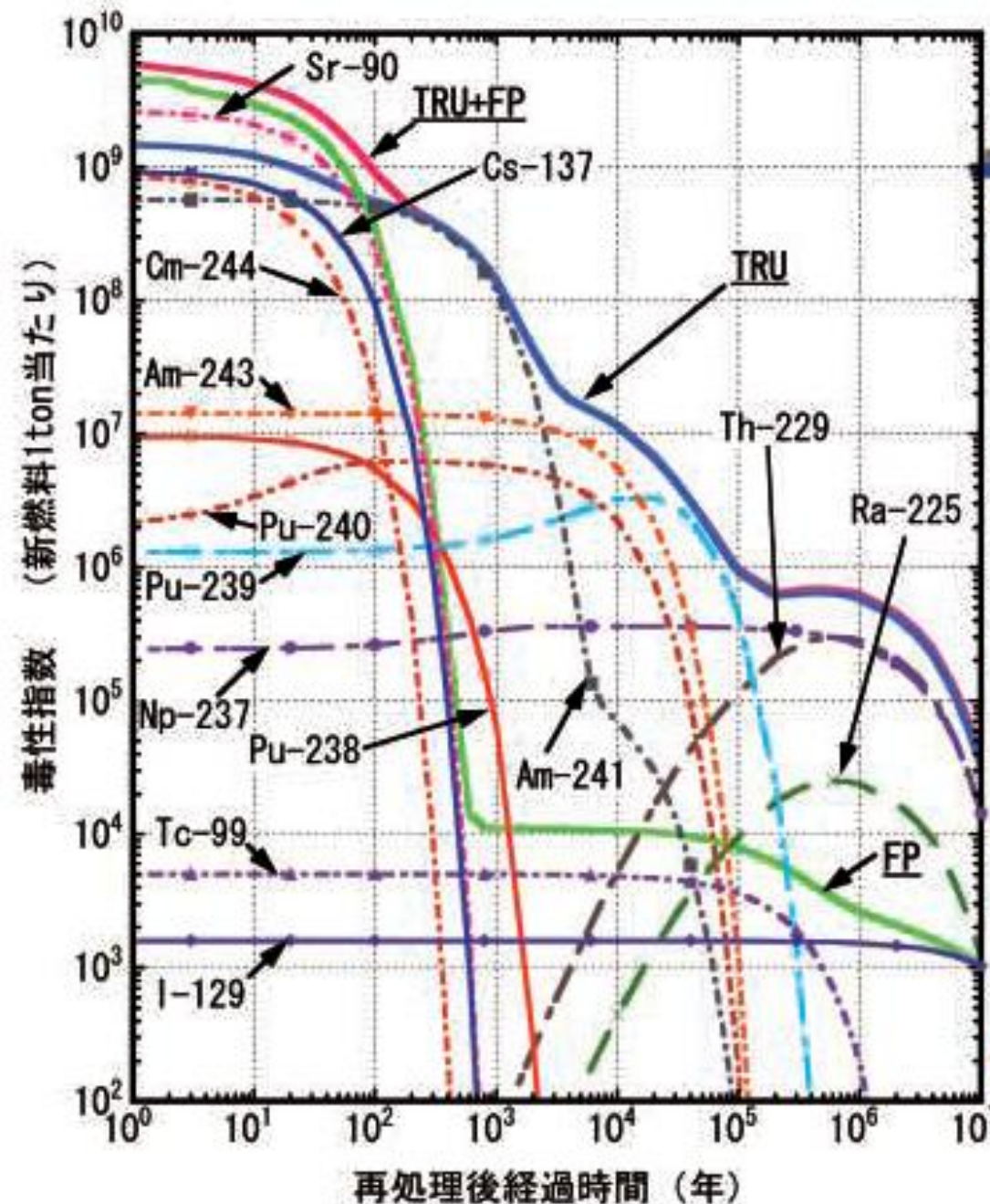
1) 核種分離技術:

- ・ADS利用型を念頭においたMA(Np, Am, Cm)や核分裂生成物(Sr, Cs)の分離技術の研究開発(原研)
- ・FBR再処理技術を念頭においたMA等分離技術(サイクル機構), 乾式再処理技術の研究開発(電中研等)

2) 核変換技術:

- ・MAの核変換特性の研究, MA燃料製造技術開発, 基礎物性測定等
- ・FBR利用型について, 実用化戦略調査研究としてシステム検討等実施中(サイクル機構)
- ・ADS利用型について, 今後の大強度陽子加速器による中性子発生技術開発と基礎物理実験を柱として, システム検討, 要素技術開発を実施中(原研)

高レベル廃棄物の放射性毒性

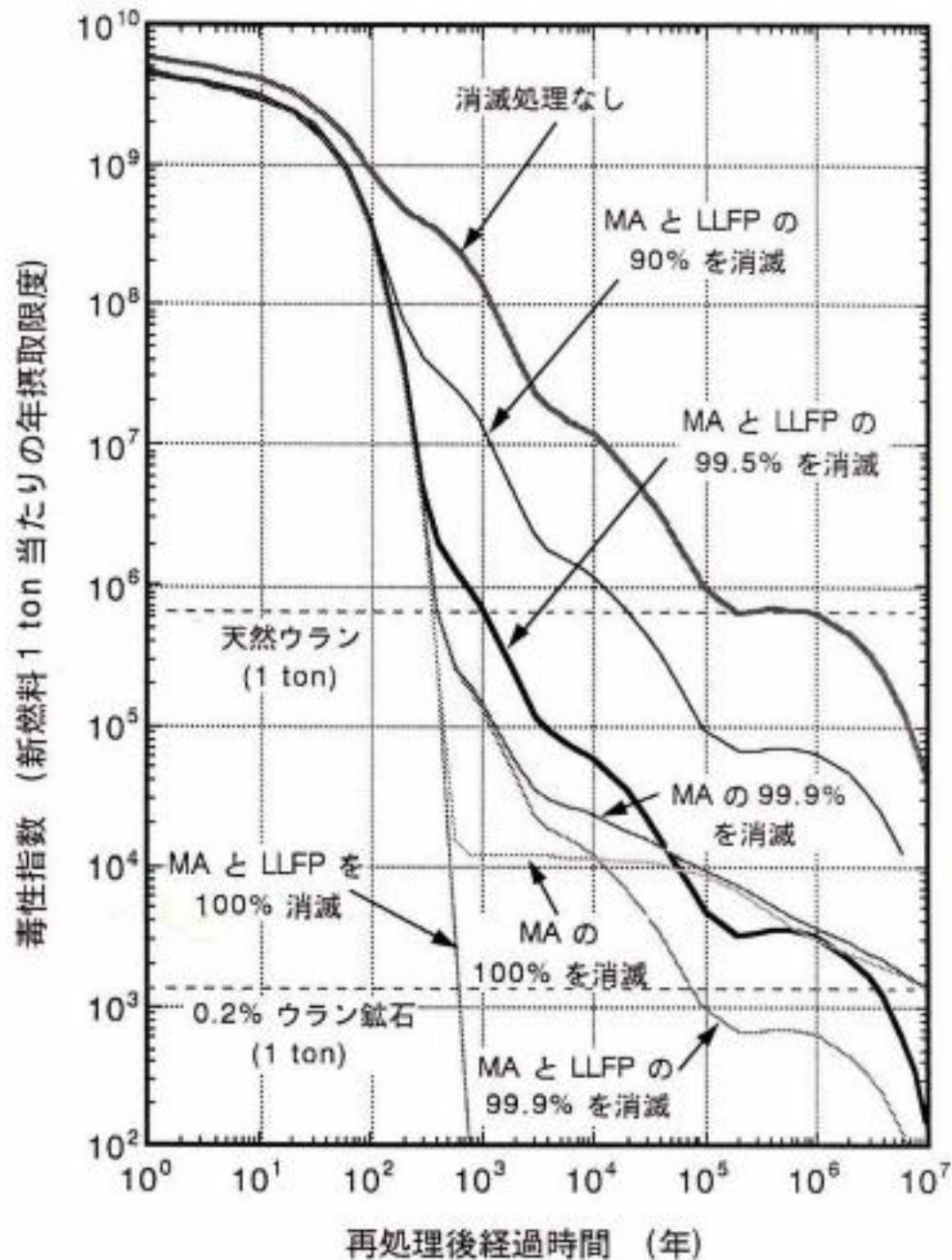


・**毒性指数**: 含まれる核種の質量をそれぞれの年摂取限度で除した数値

・再処理後100年はFPが支配
100年以降はMAが支配

半減期: Sr-90 = 28年
Cs-137 = 30年
Np-237 = 214万年
Am-241 = 433年
Am-243 = 7370年

☆MAを減らせば、長期にわたるリスクが低減できる。



半減期30年以上を対象にし、使用済燃料は燃焼度33GWd/tで3年冷却後を想定したもので、UおよびPuの回収率を99.9%を仮定している。

MAとLLFPを99.5%で処理できたとすると1000年程度で天然ウランと同程度の毒性となり、変換しない場合に同程度の毒性になるのに10万年必要とするのに比べ管理への負担は非常に軽くなる。

MA : マイナーアクチナイド
LLFP:長半減期核分裂生成物

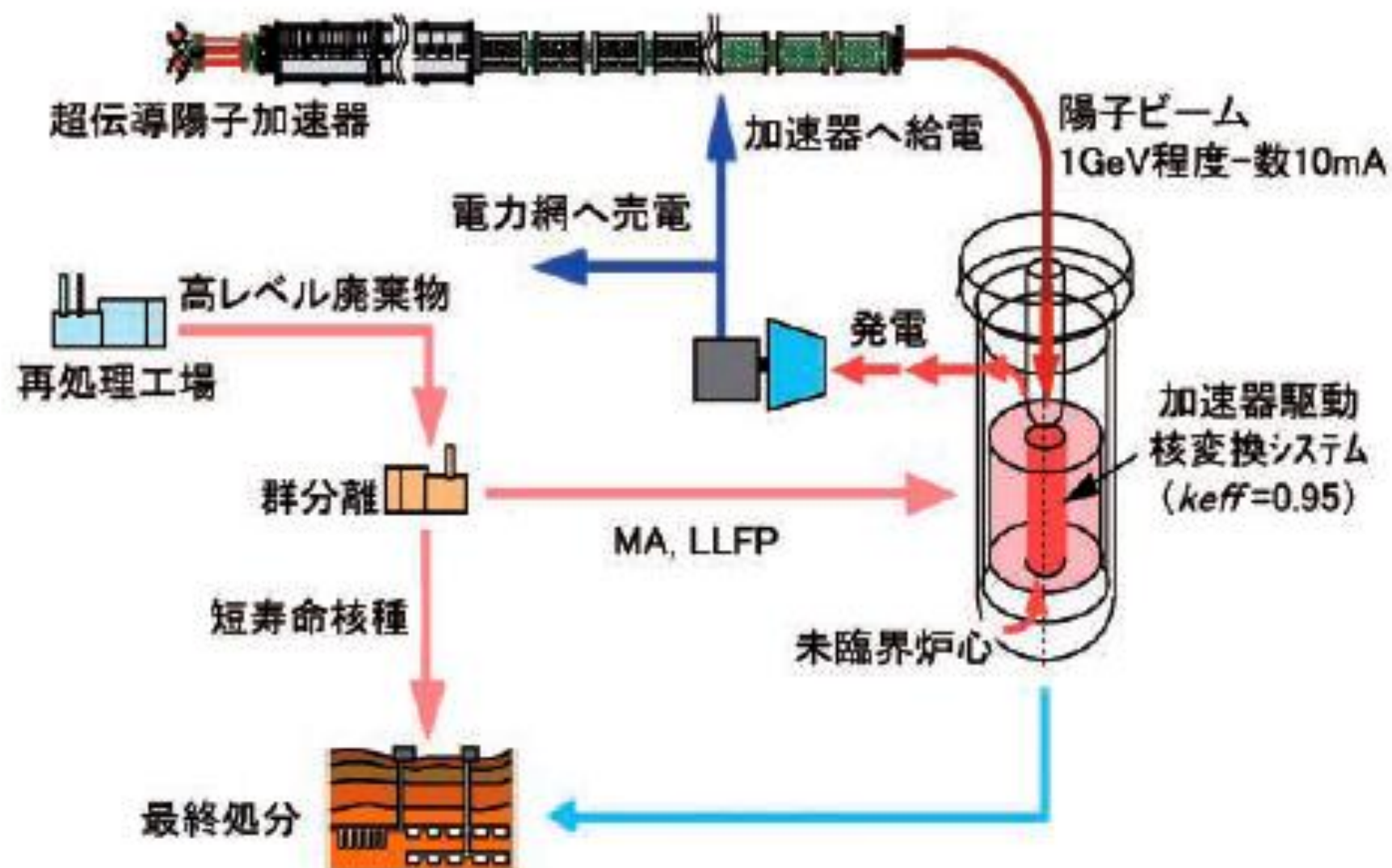
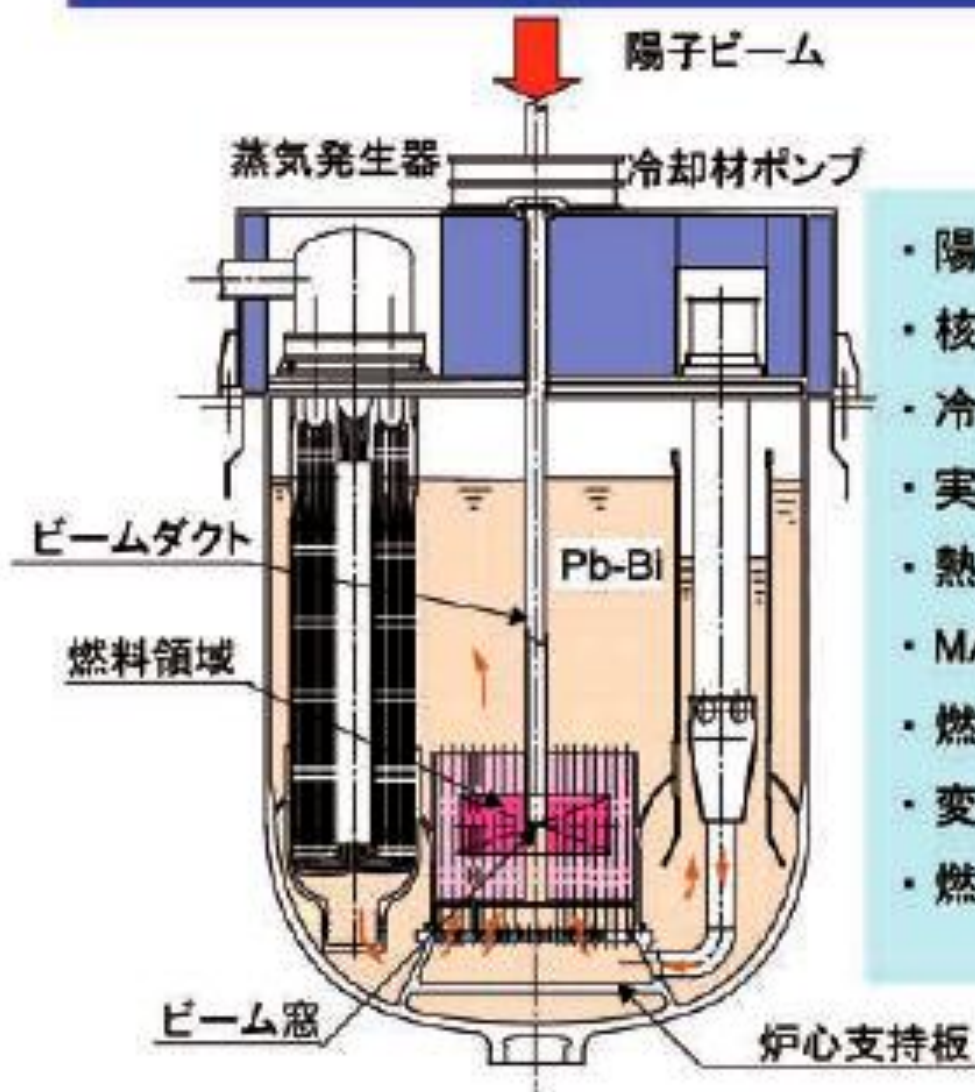


図4 ADSによる核変換システムの基本概念

ADSの設計例



- ・ 陽子加速器: 1.5GeV 22~30MW
- ・ 核破砕ターゲット: Pb-Bi
- ・ 冷却材: Pb-Bi
- ・ 実効増倍係数: $k_{\text{eff}}=0.95$
- ・ 熱出力: 800MWt
- ・ MA初期装荷量: 2.5t
- ・ 燃料組成: (40%Pu+60%MA)窒化物
- ・ 変換率: 10%MA/年(軽水炉10基分)
- ・ 燃焼反応度: +1.8% $\Delta k/k$

図5 加速器駆動未臨界炉システムの概念

- 加速器：超伝導LINAC
- 陽子ビーム：350MeV、最大1.75MW
- 核破砕ターゲット：Pb-Bi (窓無し型)
- 炉心冷却材：Pb-Bi
- 最大 $k_{\text{eff}} = 0.9552$ ($k_s=0.96$)
- 熱出力：51.75MWt
- 燃料初期装荷量：514kg
- 燃料組成：MOX (富化度30wt%)

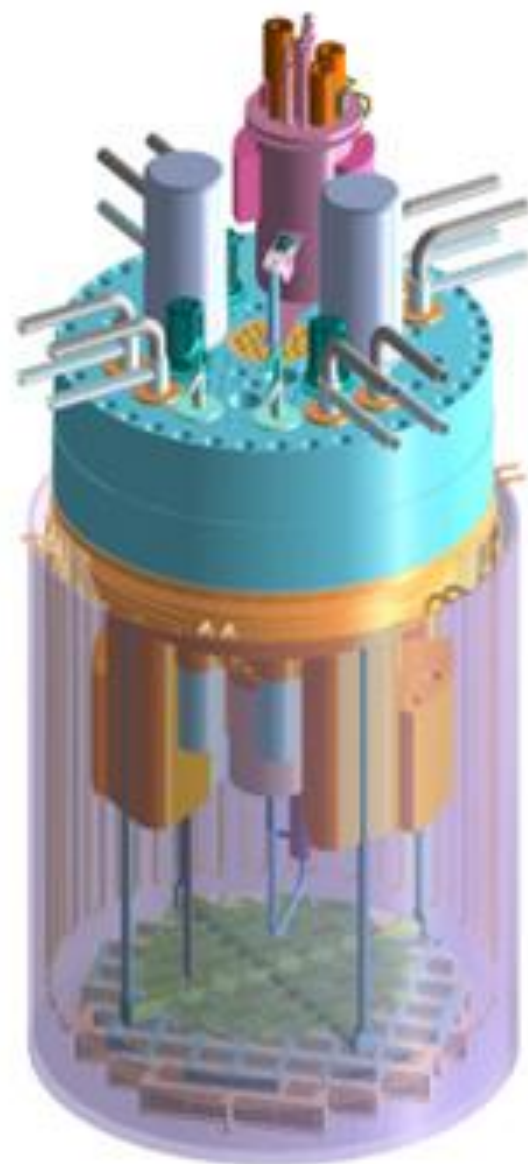


図2 ベルギー原子力研究センターの提唱する照射試験用 ADS：MYRRHA

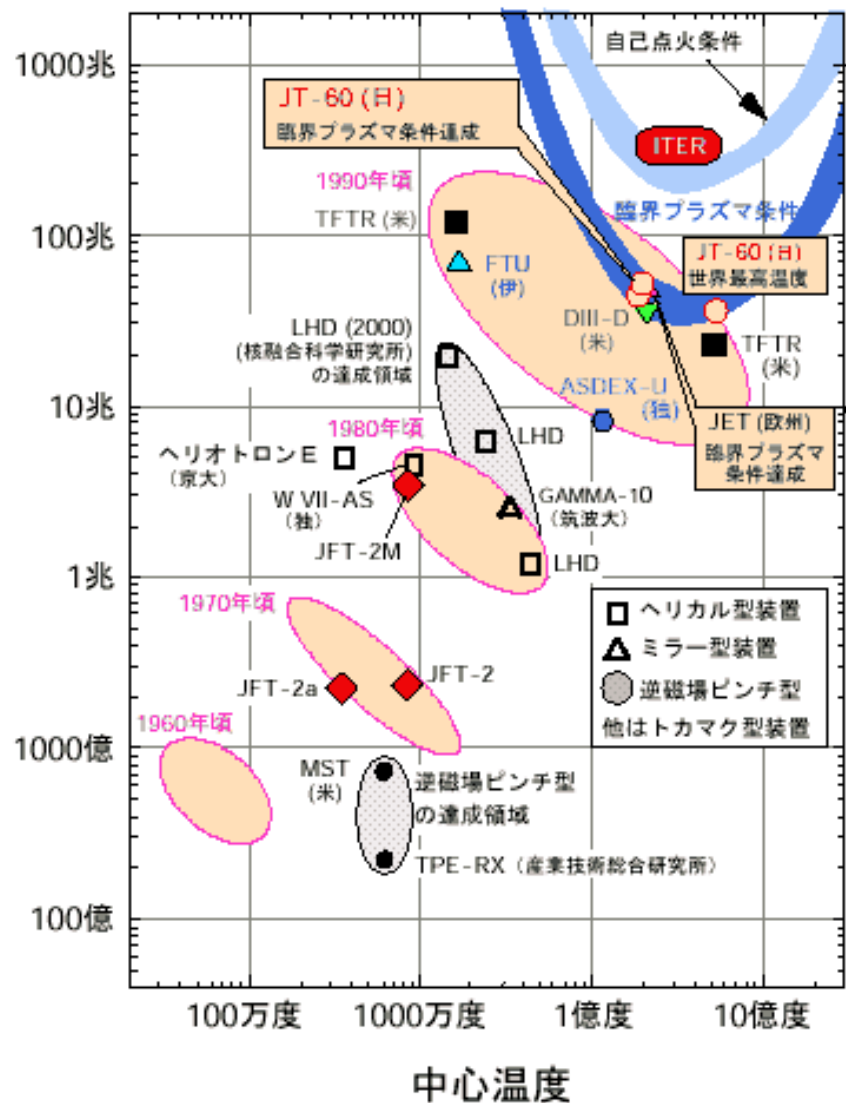
核融合 ITER計画

ITERやJT60はトカマク型であるが、

トカマク型の他に我が国独自のものとして
ヘリカル式(京大・・核融合研究所)がある
(連続運転に特徴)

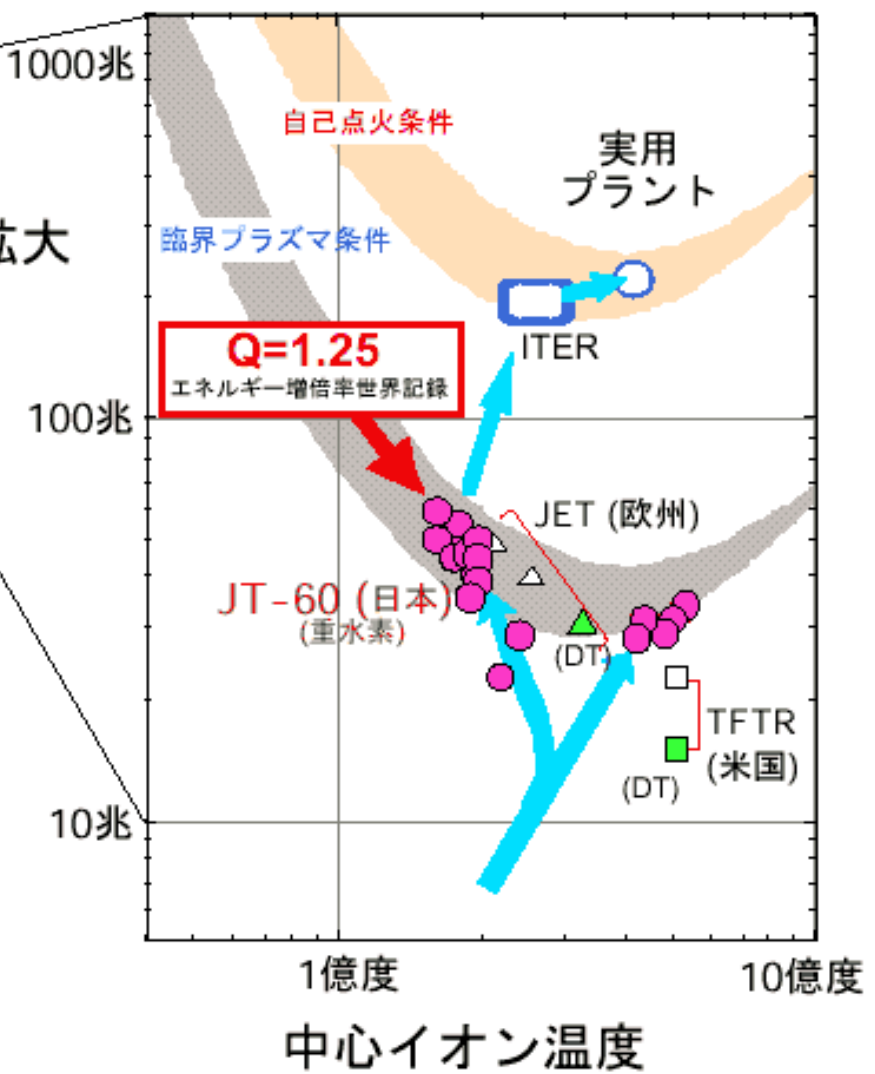
またプラズマ閉じこめ型とは別に慣性核融合方式(阪大)もある。この方式ではレーザーを使って研究がなされているが実機は粒子加速器を使う方がよいとされている

プラズマ中心密度×閉じ込め時間 (個/cm³・秒)



(エネルギー増倍率: $Q = \text{核融合出力} / \text{加熱入力}$)

拡大



[文部科学省研究開発局核融合開発室]

ITER建設地決定



カダラッシュサイト
ITER建屋配置予想図



2005年6月28日にモスクワで開催されたITER関係級会合において、ITERの建設地をフランスのカダラッシュとすることが決定され、共同宣言の署名が行われました。

ITER(国際熱核融合実験炉)について

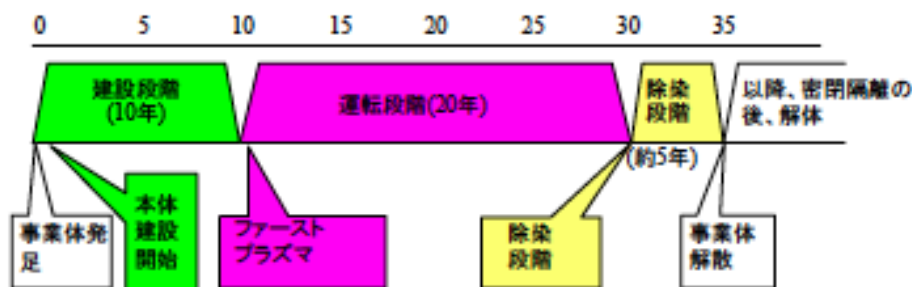
目的

- 燃焼プラズマの達成
- 長時間燃焼の実現 等

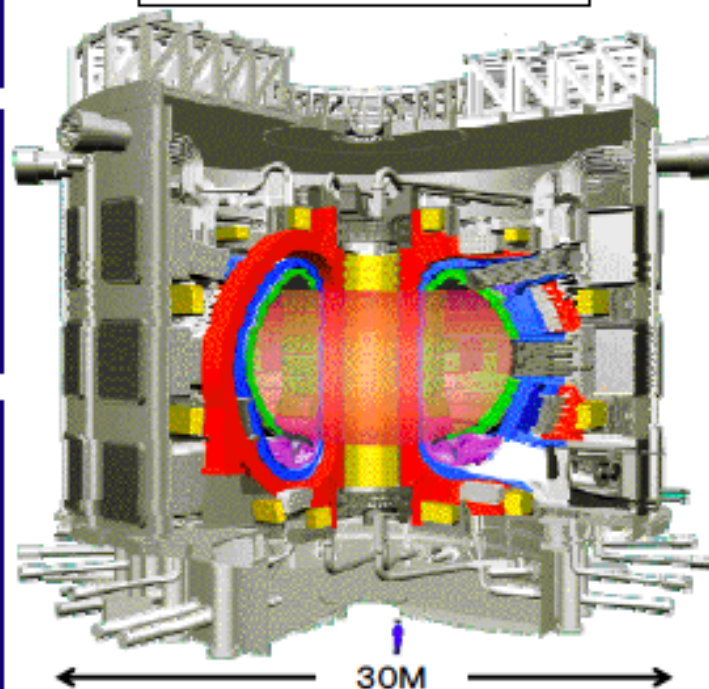
現状

- 参加極: 日本、EU、ロシア、米国、中国、韓国、インド
- 建設地: フランス・カダラッシュ
- 総経費: 約1.3兆円(建設から廃止措置まで30年余)

建設・運転計画

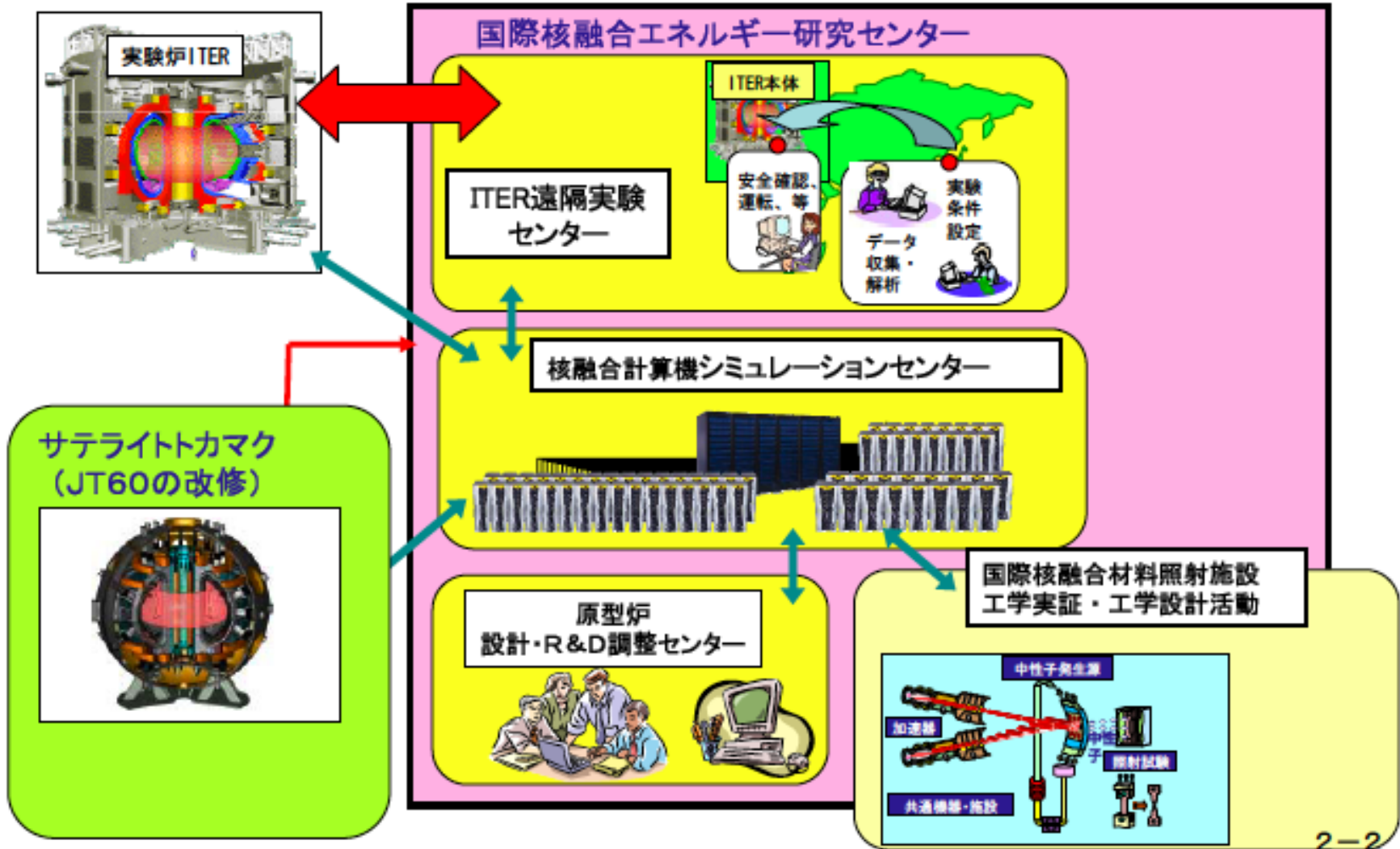


ITER概略図



核融合出力: 50万kw

幅広いアプローチのプロジェクトについて



青森国際核融合エネルギー研究センター



原型炉実現を
国際的に先導

原型炉の設計において

- ①大学等の基礎研究機関との連携交流
- ②海外核融合研究機関との連携・交流
- ③ITER、那珂研究所の実験拠点と連携・交流を実施

青森国際核融合エネルギー研究センター
原型炉(ITERの次世代炉)を目指した核融合の研究拠点



⇔
実験計画
実験データ

ITER
実験炉建設・運転
を通じた国際研究
拠点

⇕
研究交流
人材交流

海外研究機関

(研究成果)

⇕
連携大学院
人材交流

大学等
核融合の基礎研究推進拠点

核融合炉工学
ネットワーク

⇕
那珂核融合研究所
JT-60を用いた最
先端核融合の実験拠
点

国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画

国際熱核融合実験炉 (ITER) 計画は、エネルギー源としての核融合の可能性を実証するための計画で、世界人口の半分以上を代表する国々 (中国、欧州連合、日本、インド、韓国、ロシア、米国) が参加する世界最大の科学協力プロジェクトです。

1985年

米ソ首脳会談で核融合研究開発推進の共同声明

1988年～1990年

ITER概念設計活動 (CDA)

1992年～2001年

ITER工学設計活動 (EDA)

2001年～2002年

ITER調整技術活動 (CTA)

建設に向けて政府間協議を開始 (2001年11月)

2003年～

ITER移行措置 (ITA)

2005年6月

ITER建設地がフランス・カダラッシュに決定

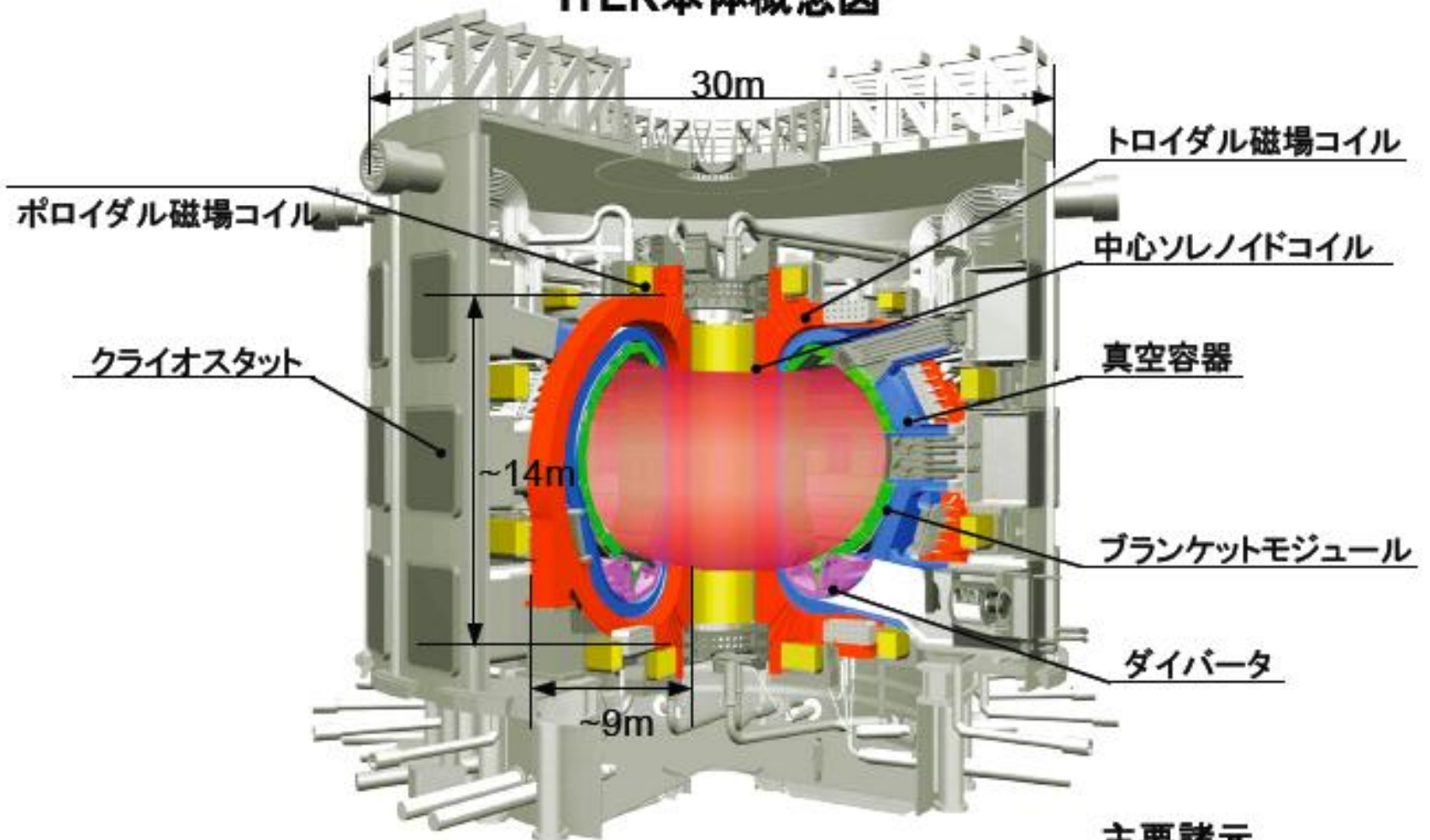
2006年5月

ITER協定案に仮署名

2006年11月

ITER協定等に署名

ITER本体概念図



主要諸元

核融合出力 50万kW

プラズマ主半径 6.2m~6.5m

プラズマ副半径 1.9m~2.4m

プラズマ電流 1300~1700万A

ITER計画の目標

- 制御された点火条件と長時間の核融合燃焼
- 核融合エネルギーの利用に必要な工学技術の集成

ブローダーアプローチ(BA)計画の概要

- 目的: 核融合エネルギーの早期実現を支援する幅広い取り組み活動として、3つの事業を共同で実施(協定第1、2条)
- 期間: 10年間。その後、終了手続きがなされない場合自動延長。但し、ITER計画への参加継続が条件(協定第22条)
- 資源: 日欧が460億円相当ずつ費用負担することにより、計920億円相当を拠出(協定第12条及び共同宣言)
- 参加: ITER協定の他の締約者が参加を希望する場合には、事業長の提案に基づいて運営委員会が決定する(協定第25条)

国際核融合材料照射施設の 工学実証・工学設計活動

(附属書Ⅰ)

【目的】

国際核融合材料照射施設(IFMIF)の十分に統合された工学設計並びにIFMIFの建設、運転、利用、及び廃止に係る将来の決定に必要なすべての資料を作成し、IFMIFを構成する各設備の継続的かつ安定的な運転を実証するため、工学実証及び工学設計活動(EVEDA)を実施する。

作業場: 青森県六ヶ所村
実施期間: 6年

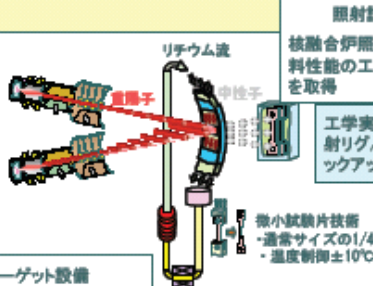
IFMIFの主要設備

重陽子ビーム発生設備
長時間安定に10MWの連続重陽子ビームを生成

工学実証では主に1/4規模のプロトタイプを建設

液体リターゲット設備

1GW/m²のビーム入熱に耐えて大量の核融合中性子を発生



照射試験設備

核融合炉照射条件下の材料性能の工学実証データを取得

工学実証では主に照射リグ/アセンブリ・モックアップを製作

微小試験片技術
- 通常サイズの1/4
- 温度制御±10℃

工学実証では主に1/3規模のLi試験ループを建設

国際核融合エネルギー研究センター

(附属書Ⅱ)

【目的】

ITER事業へ貢献すること及び将来の動力用原型炉(DEMO)の早期の実現を促進することを目的として、国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)において研究開発の活動を実施する。

作業場: 青森県六ヶ所村
実施期間: 10年

原型炉設計研究開発調整



ITER遠隔実験



核融合シミュレーション



サテライトトカマク装置

(附属書Ⅲ)

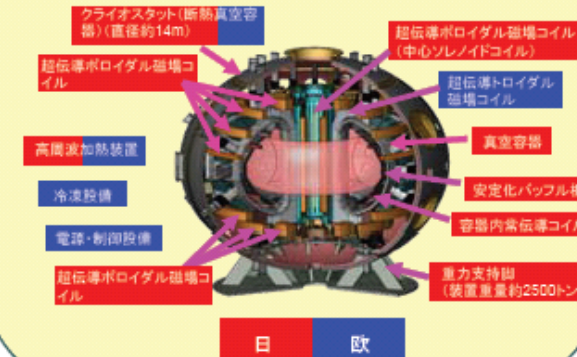
【目的】

次の事項を含む計画を実施する。

- 日本の実施機関が所有するトカマク実験装置の先進超伝導トカマク改良への参加。
- ITER及びDEMOの重要な物理的問題に取り組むことにより、ITERの利用及びDEMOに向けた研究を支援する先進超伝導トカマク利用への参加。
- 先進超伝導トカマクの建設及び利用は、サテライト・トカマク計画及び日本国内の計画に基づいて実施し、利用機会は均等に分配する。

作業場: 茨城県那珂市

実施期間: 10年(運転のための3年を含む)



日欧の貢献分担

(in percentages)

Project	EU	JA	Sum
IFMIF-EVEDA	14.4	7.6	22.0
IFERC	12.0	18.7	30.7
Satellite Tokamak Programme	23.6	23.6	47.3
Total	50	50	100

The overall EU contribution is 339 MiEuro value May 2005, and

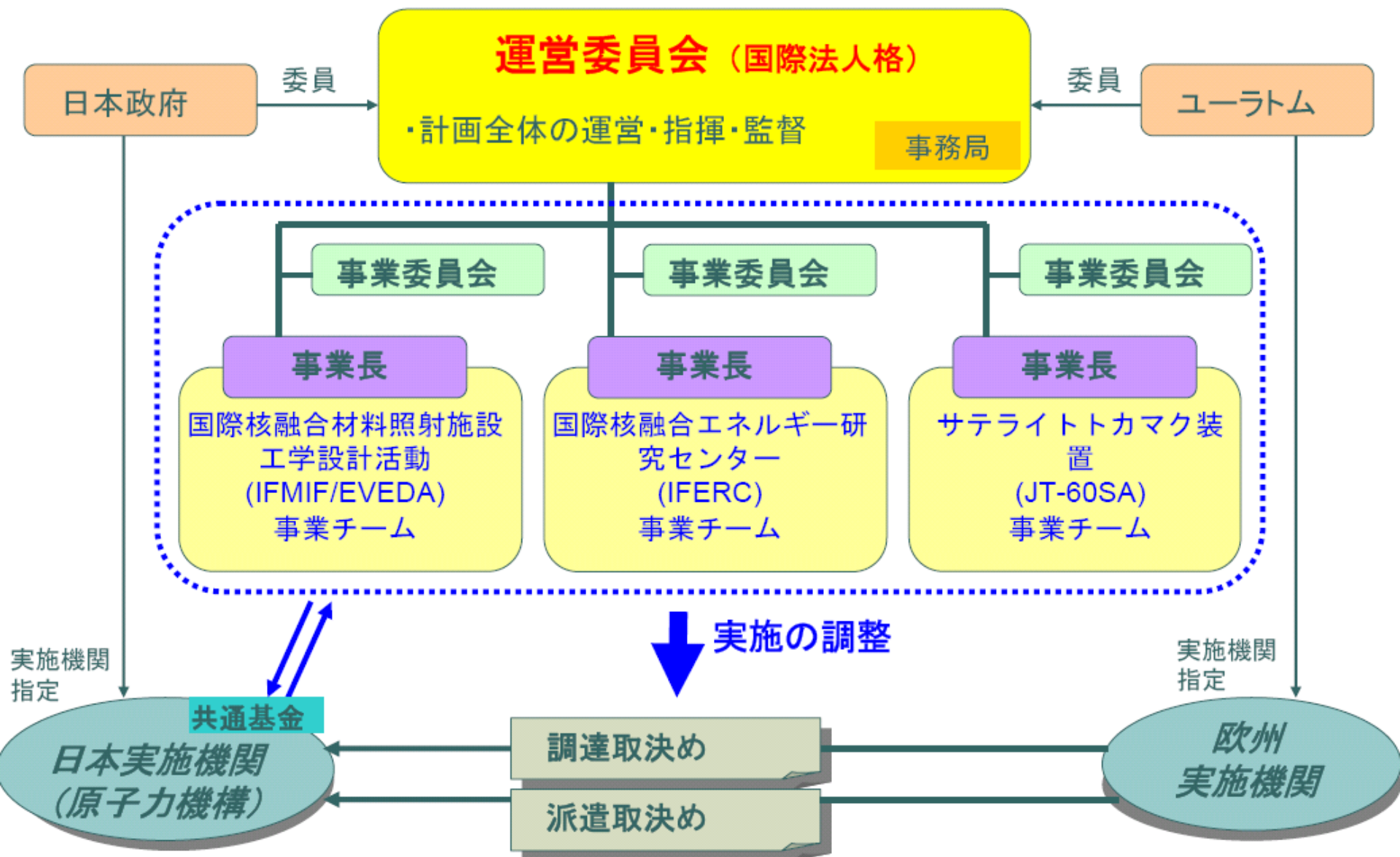
The overall JA contribution is 46 Byen value May 2005.

Mostly in kind.

Schedule of the BA Projects

Project		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
IFMIF	EVEDA	—————										
IFERC	Site&Buildings	—————										
	Computer Simulation Center					—————					
	DEMO Design R&D Co. Center	—————										
	ITER Remote Exp. Center								—————		
	Others	—————										
Satellite Tokamak Programme	Construction	—————										
	Operation								—————			

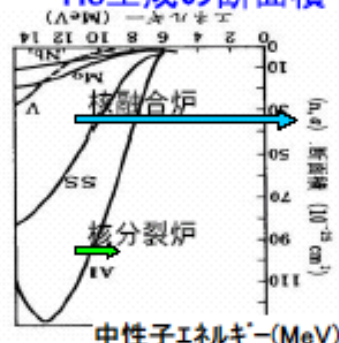
BA活動実施の基本枠組み



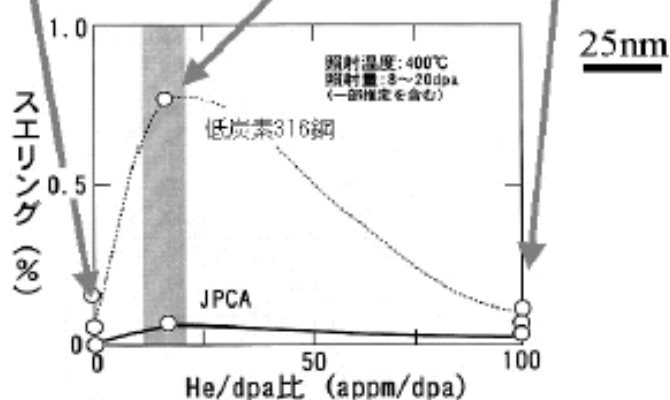
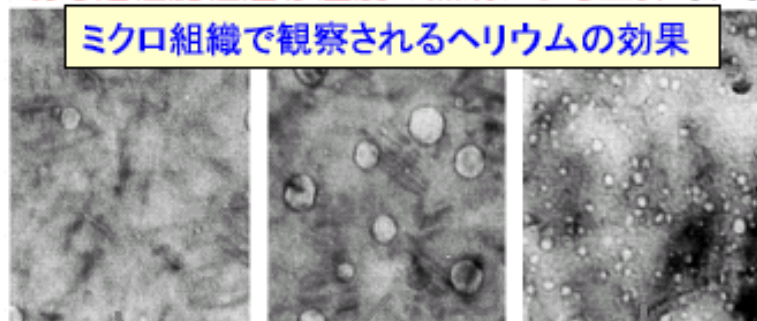
IFMIFの必要性—照射場の要件

- 照射場は使用環境下の弾き出し損傷量と、中性子によるヘリウム生成等核変換の影響を同時に模擬すること。特にHe/dpa比が核融合条件と一致することが必要。
- He/dpa比によって組織中のポイド生成の様子が大きく異なりスエリング特性が変化。使用温度、損傷速度等の影響も大きく、モデル計算で十分な精度を得ることができない。
- He/dpa比は316鋼等のIASCC、フェライト/マルテンサイト鋼で**最重要特性である延性脆性遷移温度の照射による上昇等**においても重要。

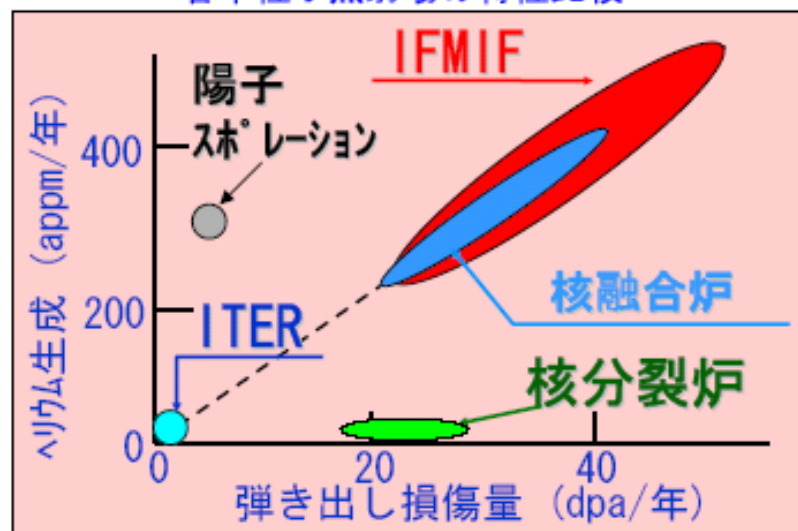
He生成の断面積



マイクロ組織で観察されるヘリウムの効果



各中性子照射場の特性比較



dpa: 原子当たりの弾き出し回数 (displacement per atom)
appm: 核変換濃度 (atom part per million)

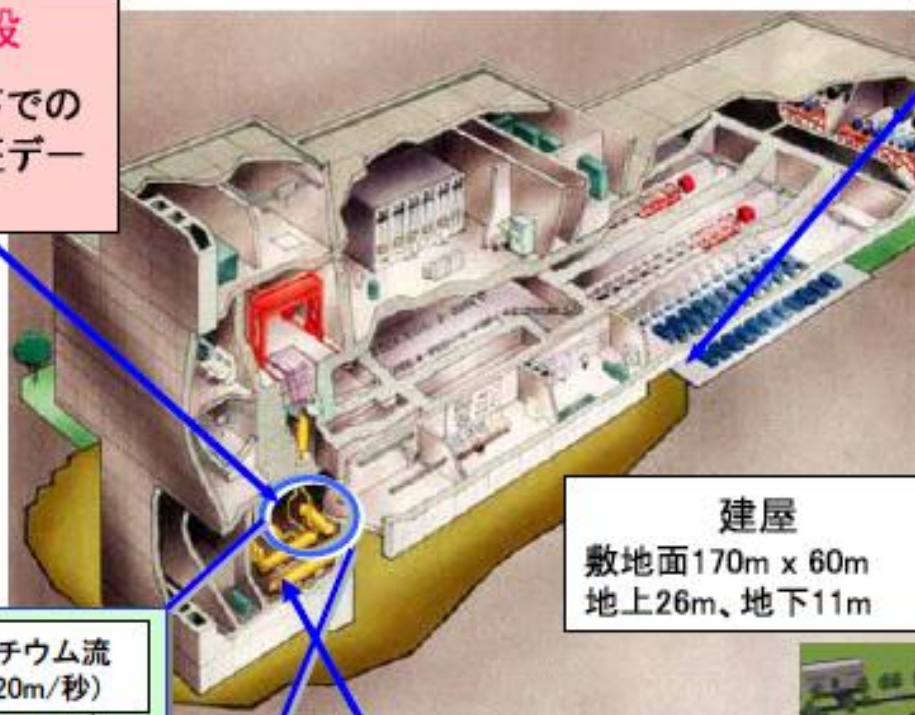
IFMIF施設の概要

テストセル施設

核融合炉照射条件下での材料性能の工学実証データを取得

重陽子線形加速器

長時間安定に10MWの連続重陽子ビームを生成



建屋

敷地面170m x 60m
地上26m、地下11m

照射試料容器

リチウム流
(20m/秒)

中性子

照射環境計測
制御アセンブリ

重陽子ビーム
(40MeV, 125mA_{x2})

中性子重照射試験の原理

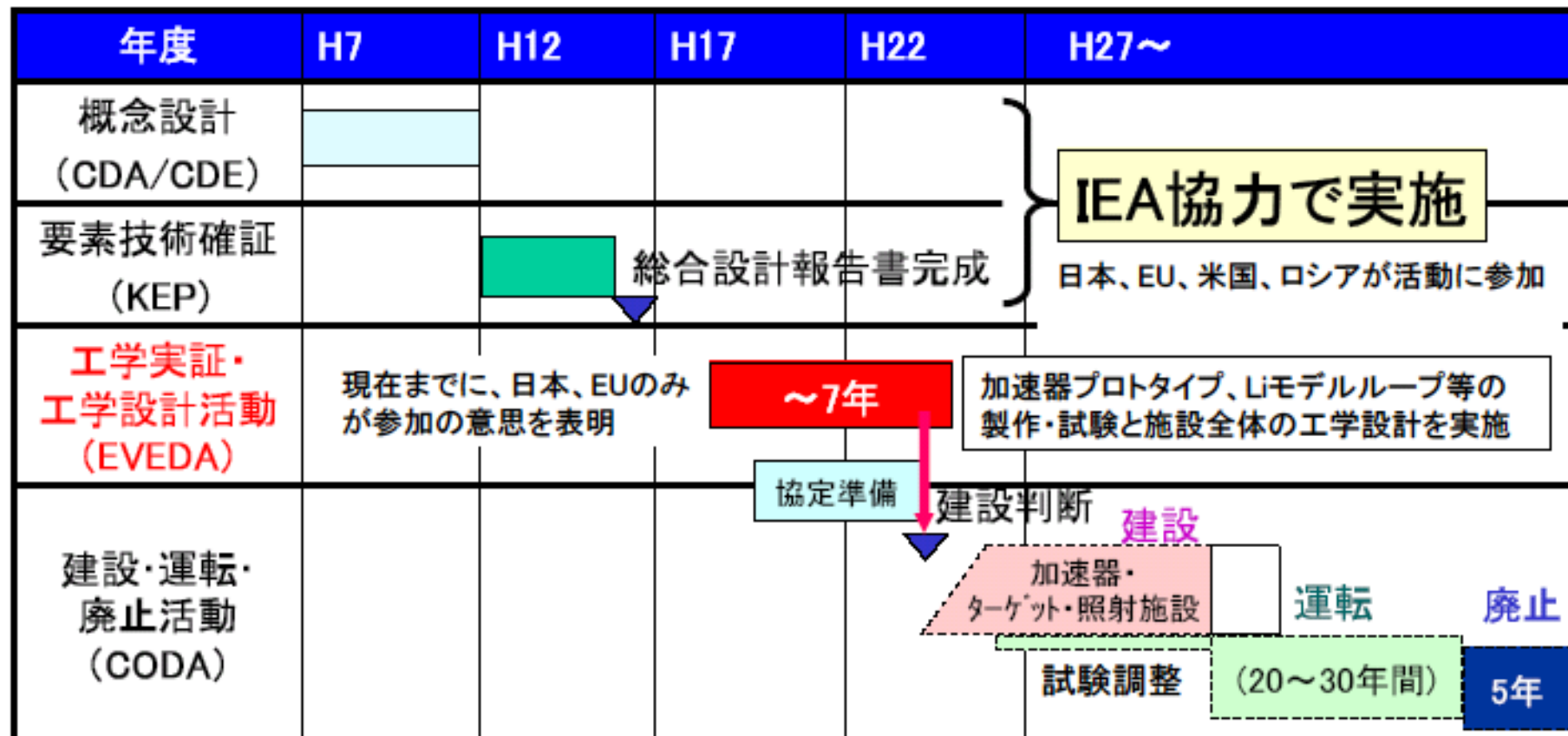
液体Liターゲットループ

1GW/m²のビーム入熱に耐えて大量の核融合中性子を発生

IFMIFサイト鳥瞰図



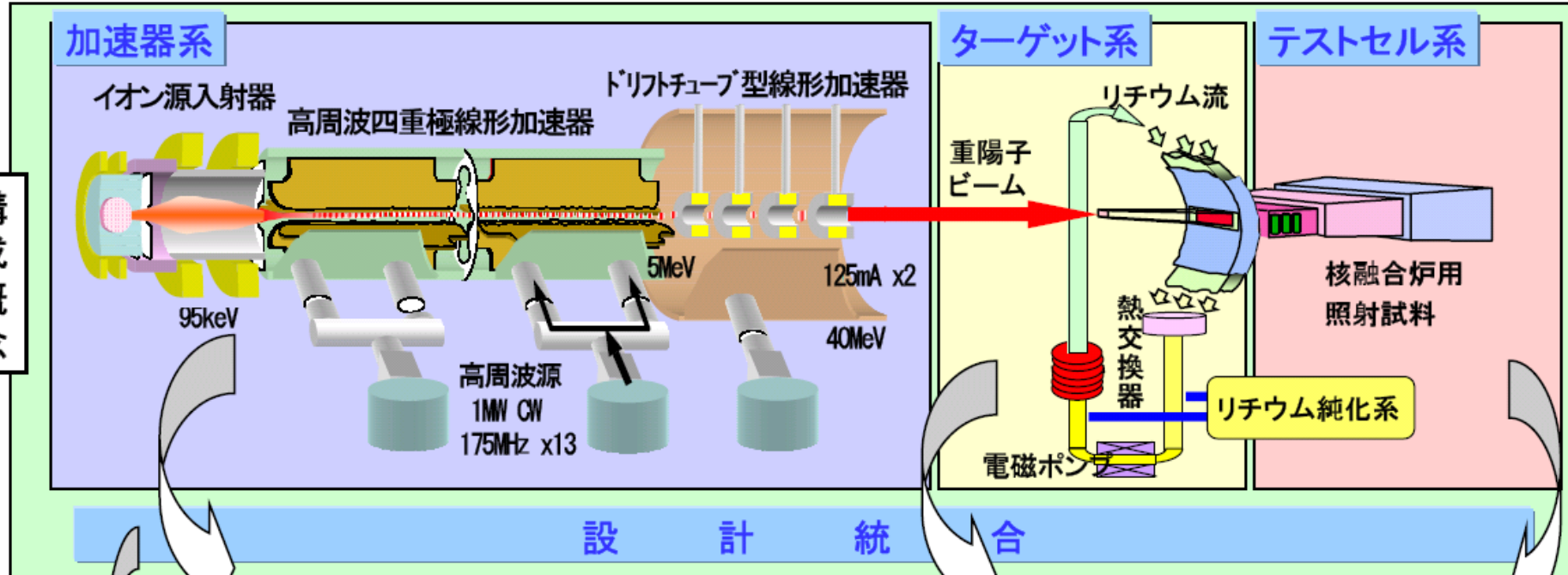
IFMIF計画のスケジュール



CDA: Conceptual Design Activity
 CDE: Conceptual Design Evaluation
 KEP: Key Element technology Phase
 EVEDA: Engineering Validation and Engineering Design Activity
 CODA: Construction, Operation and Decommissioning Activities

EVEDA計画の実施内容

- IFMIF建設判断に必要な十分に統合された工学設計及びその裏付けとなる技術データを整えることを目標とする。
- そのため、総合的なIFMIFプラントの最終設計と原型コンポーネントの製作プロセスの開発とIFMIF運転上クリティカルとなる長時間耐久性などの性能実証を行う。



構成概念

総合設計報告書 (CDR)に記載のタスク

- ・イオン源試験 (H₂, D)
- ・加速部分モジュール試験
- ・診断系
- ・加速器系システム設計

加速器プロトタイプの選択も有

- ・主ループモデル製作試験
- ・計測 / Li純化系
- ・遠隔操作機器交換
- ・ターゲット系システム設計

- ・テストモジュール製作試験
- ・微小試験片
- ・計測診断 / 遠隔操作
- ・テストセル系システム設計

国際共同チーム ・ 建屋・ユーティリティ設計 ・ 安全性検討・機器仕様への反映

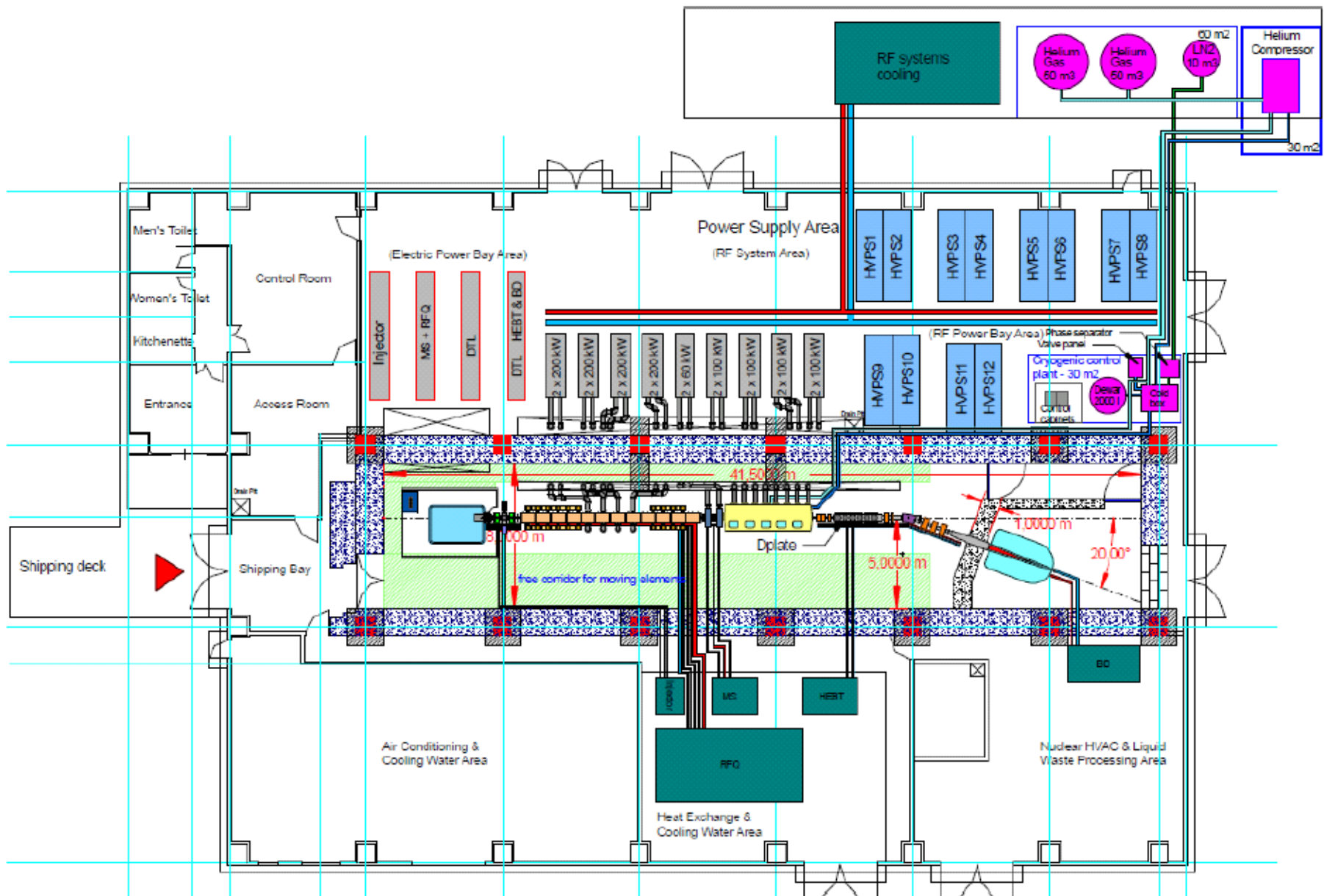


Figure 11: Layout of the prototype accelerator in the IFMIF/EVEDA accelerator building.

Table 1: Main RFQ parameters.

Particles	D+	
Frequency	175	MHz
Input current	130	mA
Input emittance	0.25	π .mm.mrad
Max Surface field	25.6	MV/m
Length	9.78	m
Voltage min/max	79/132	kV
R0 min/max	4.1/7.1	mm
Transmission (Gaussian)	96	%
Power dissipation in Cu	< 650	kW

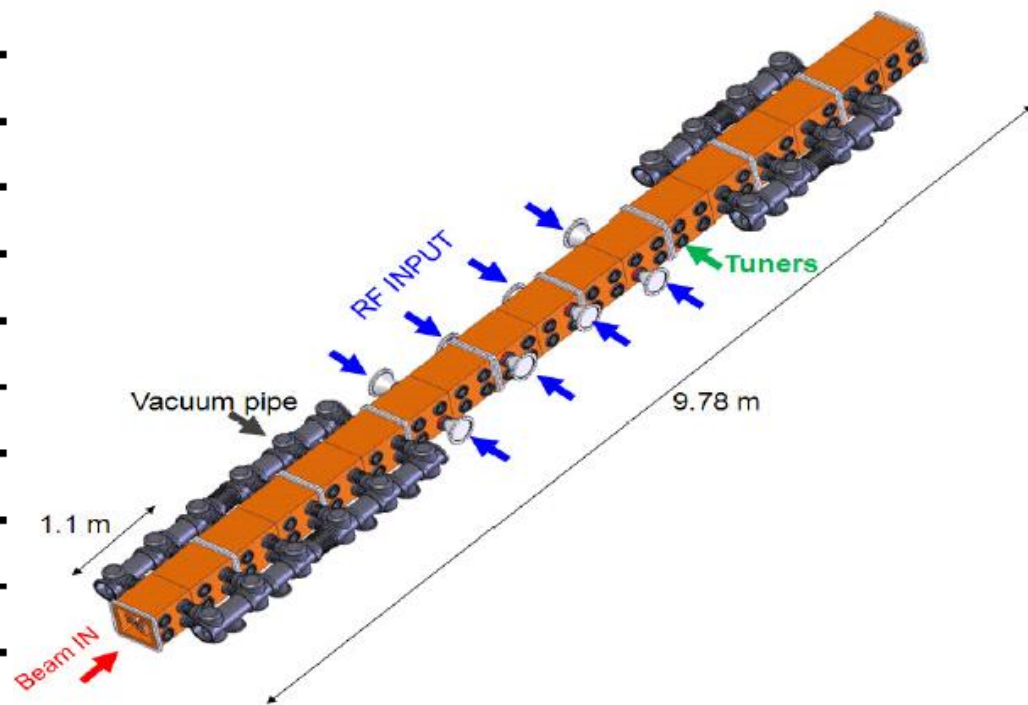


Figure 5: Schematic view of the RFQ.

IFMIF/EDEVAの初段RFQlinac

Table 2: Main parameters of the HWR Linac.

Cryomodule	1	2	3 & 4
Cavity geometric β	0.094	0.094	0.166
Cavity length (mm)	180	180	280
Beam aperture (mm)	40	40	48
Nb cavities / period	1	2	3
Nb cavities / cryostat	1 x 8	2 x 5	3 x 4
Nb solenoids	8	5	4
Cryostat length (mm)	4.64	4.30	6.03
Output energy (MeV)	9	14.5	26 – 40

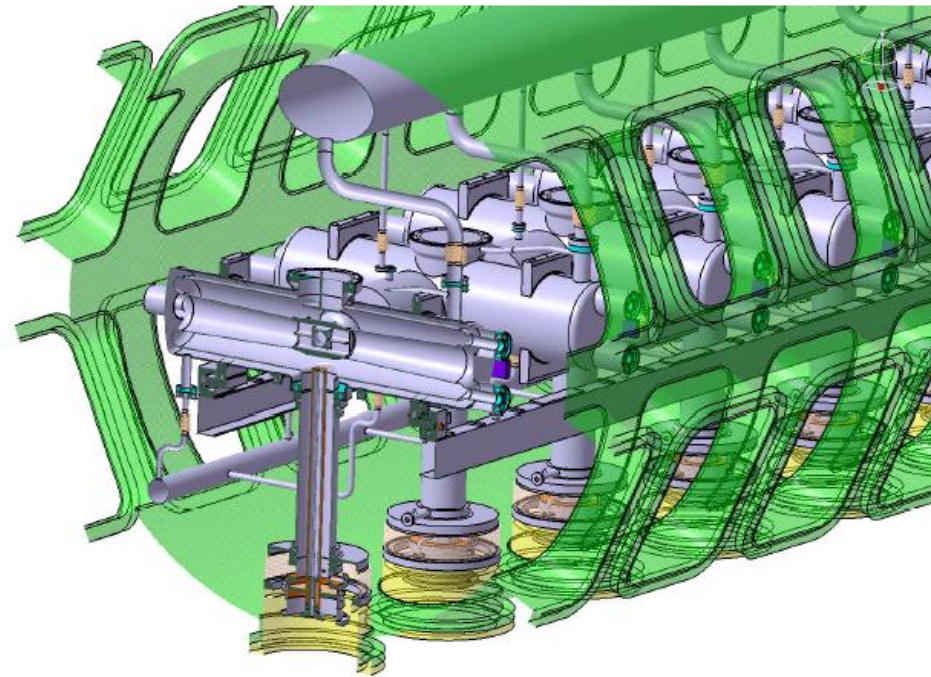


Figure 6: Overview of the EVEDA cryomodule.

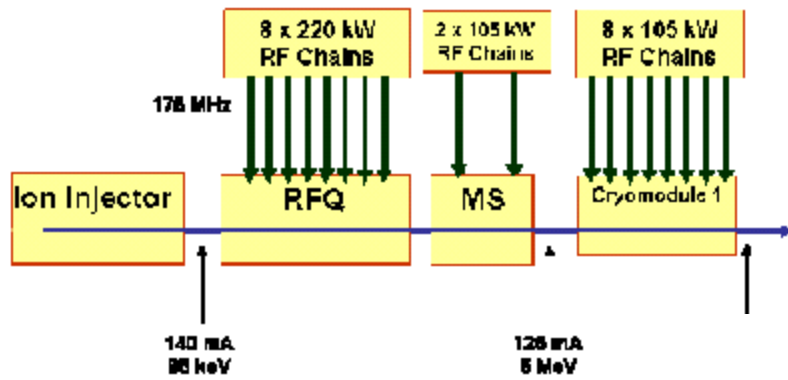


Figure 9: RF power stations for the prototype

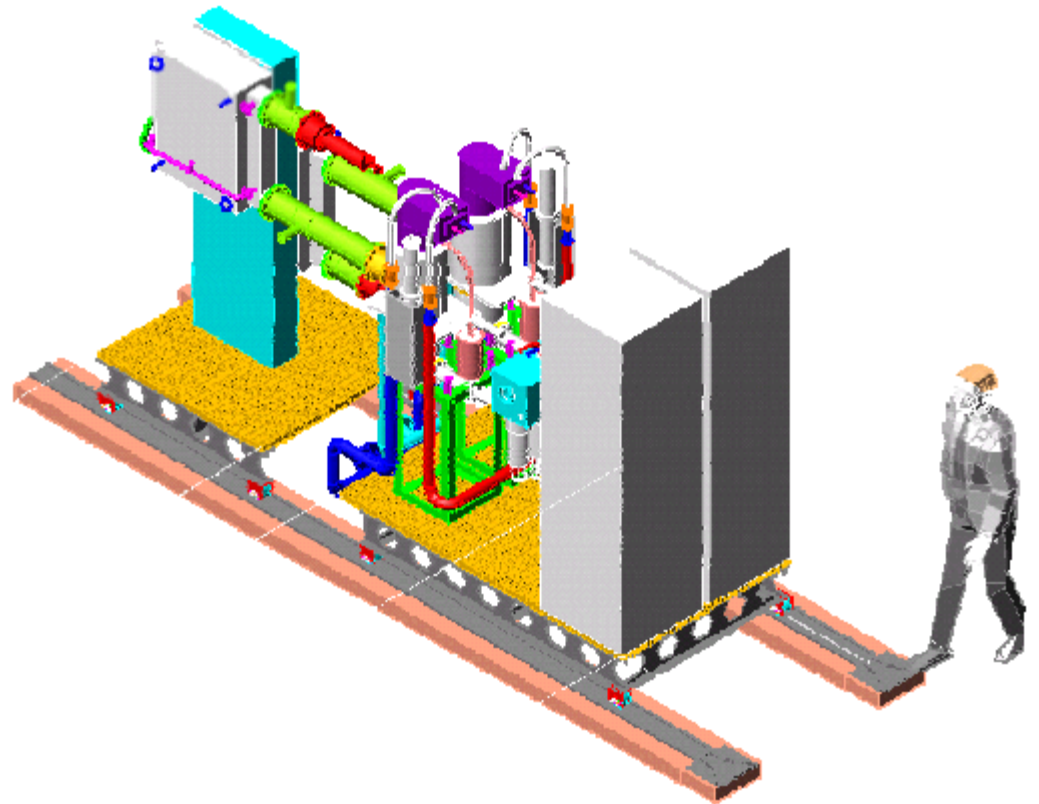


Figure 10: Removable RF power module.

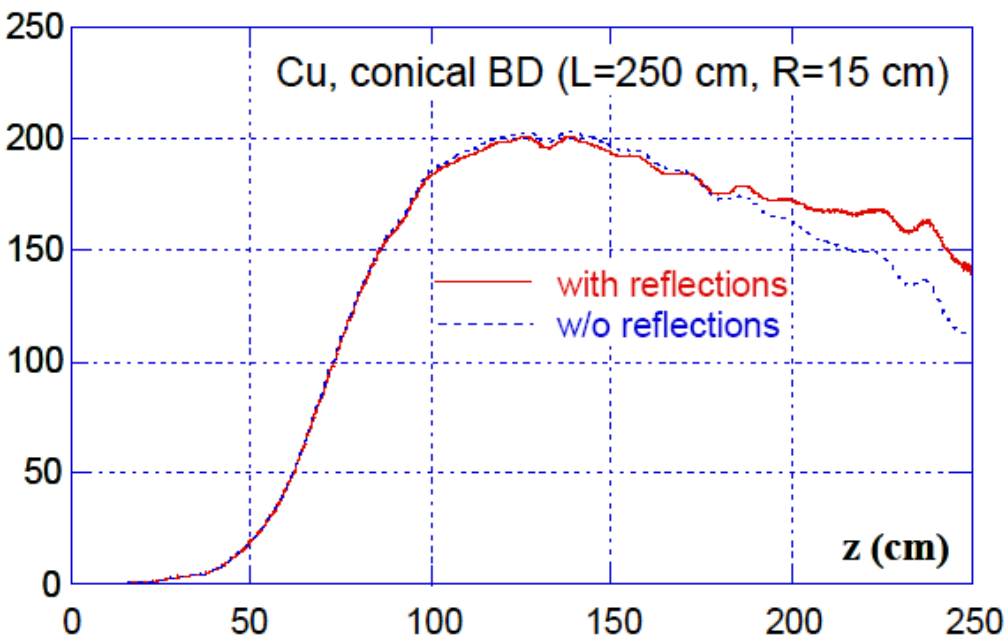


Figure 13: Power density at BD surface (W/cm^2).

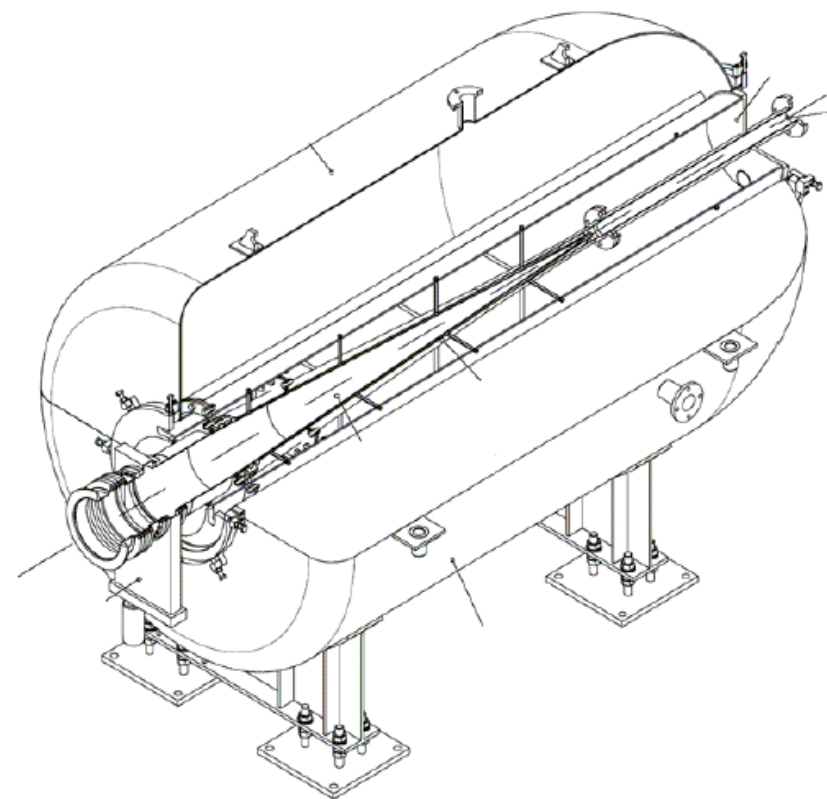
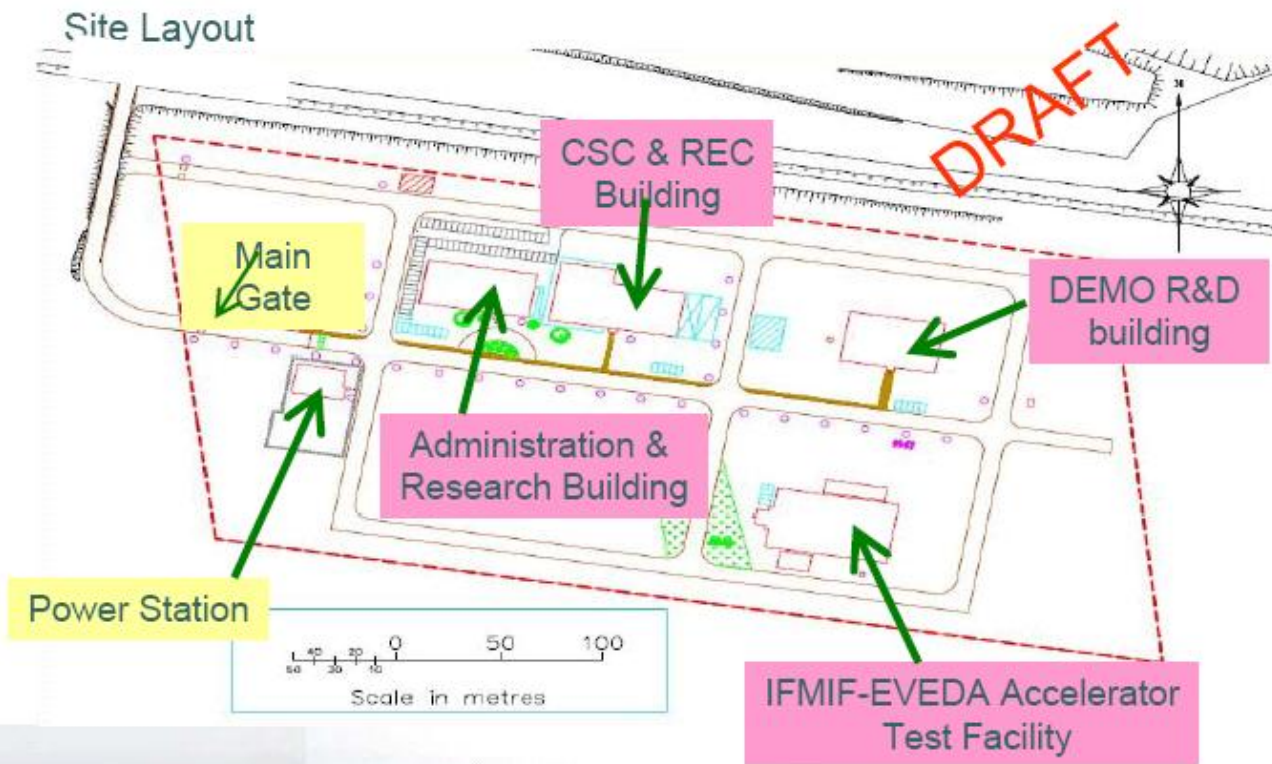


Figure 14: Mechanical design of the beam dump.

Rokksho Site for Broader Approach



原子力分野の研究開発の分担連携

学術研究・知的好奇心

利用可能性の研究開発

実用・採算・可能性の研究開発

実用・大量生産

(基礎)

(応用)

Fundamental science

Basic research

Development

Industry

核融合

FBR

核変換・安全

中性子利用

LHD

JT60

ITER

IFMIF

常陽

もんじゅ

実証炉

FCA+

複合システム

実証炉

KART

(KUR-M)

JMTR

J-PARC

JRR3

連携ネットワーク

大学

核融合研

文科省関係独法研究所

経産省関係研究所

民間企業等

京大炉等

KEK等

JAEA 理研・Spring-8 放医研等

産総研等

平和利用と安全のための技術開発に

原子核研究者（理学系）、

原子力研究者（工学系）、

原子力施設製造・電力事業企業研究者

が連携して取り組み、

国民の期待に応えなければならない

ご静聴有り難うございました