

平成10年度原子力関係研究開発課題
(補足説明資料)

平成9年7月1日

理化学研究所

分子レーザー法ウラン濃縮に関するブレイクスルー研究

- 1 反応プロセスブレイクスルー研究
- 2 レーザーブレイクスルー研究

理研式分子法

特長

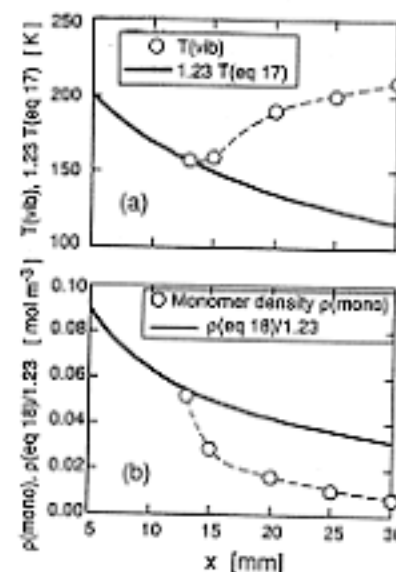
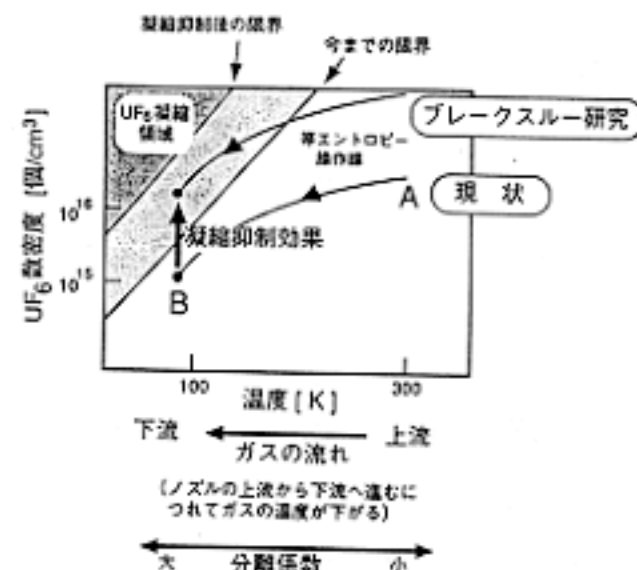
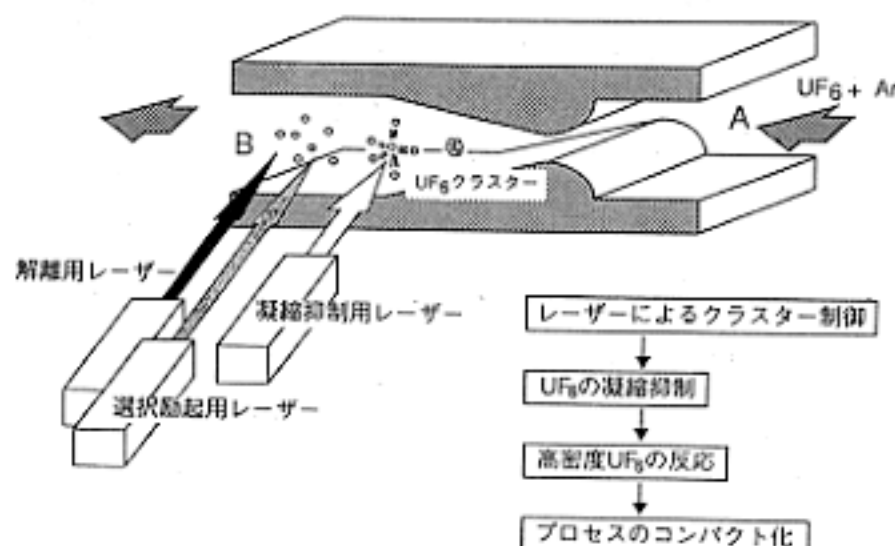
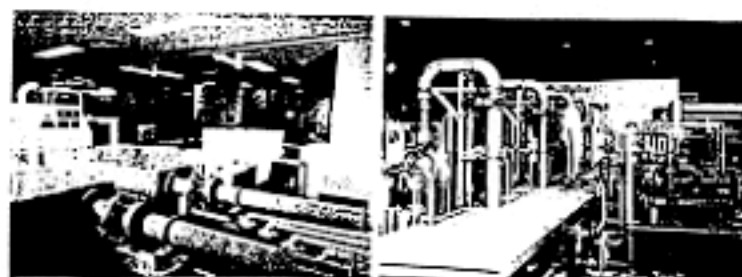
- ・過冷却 UF_6 を強力な赤外レーザーで多光子解離させる。
→ 独自の方式
- ・他の分子法開発国(ドイツ、南ア)も理研と類似な方式に方針転換した。

利点

- ・今までの制限条件を打破して分離性能を飛躍的に向上させるための技術の開発。
→ ブレイクスルー研究 (理研)
- ・理研からの技術移転を受け、システム化、スケールアップをはかる。
→ 工学試験 (動燃)

動燃における100Hzレーザーシステム

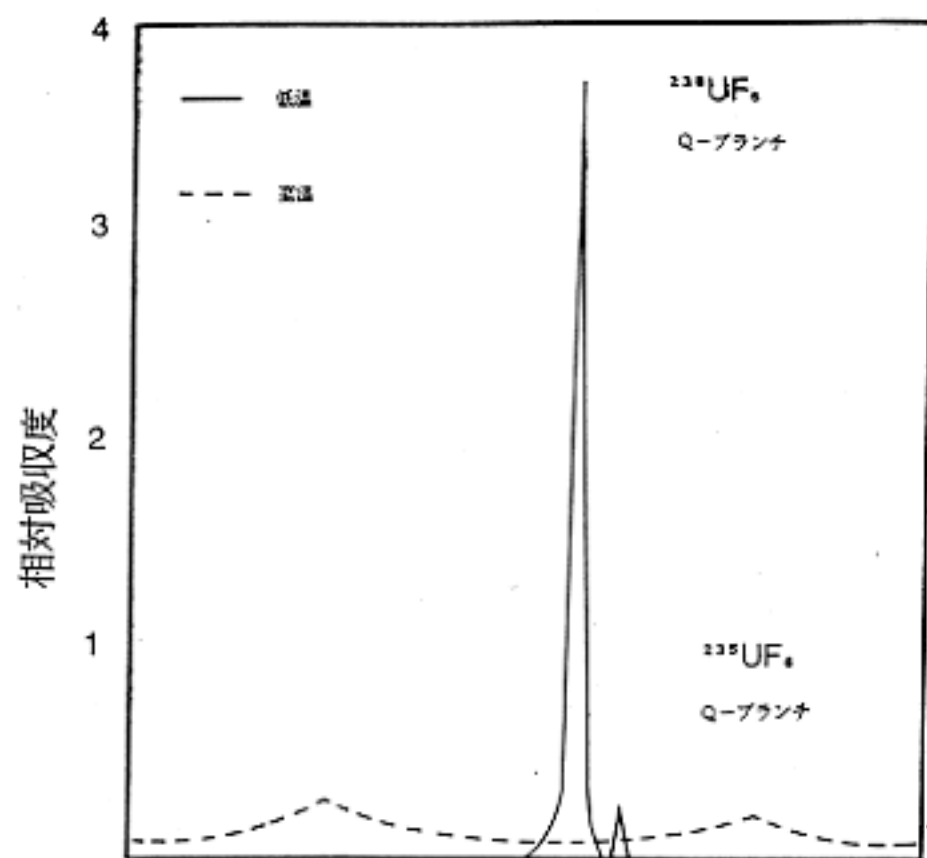
動燃における反応プロセスシステム



(a) Vibrational temperature $T(vib)$ and temperature calculated using eq 17 multiplied by 1.23, $1.23 T(eq 17)$.
(b) Monomer density $p(mono)$, and density calculated using eq 18 divided by 1.23, $p(eq 18)/1.23$.

2 レーザーブレイクスルー研究

重水素ラマンレーザーとUF₆の吸収スペクトル



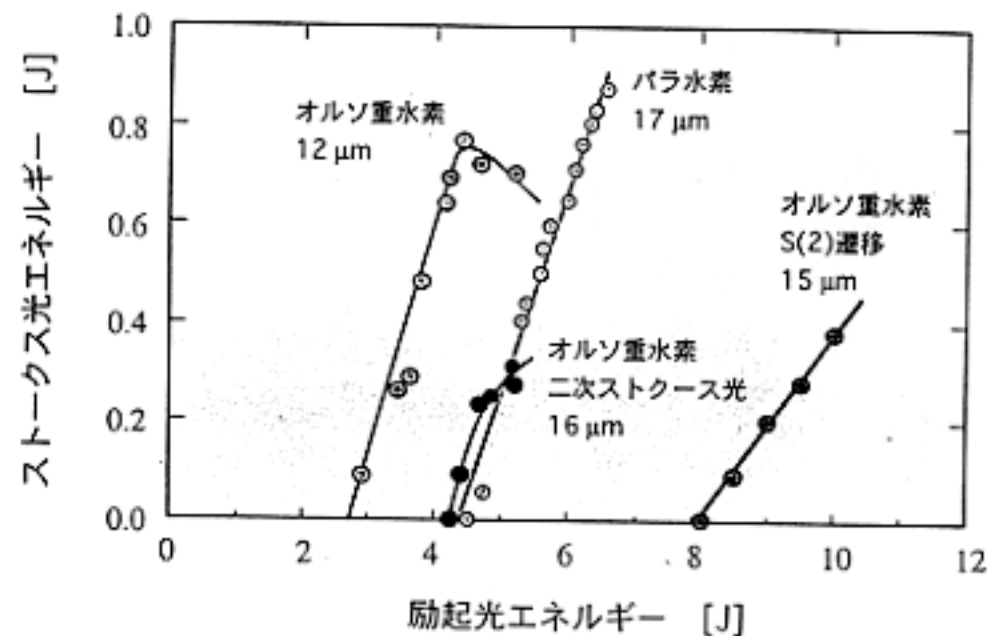
重水素ラマンレーザーの周波数



パラ水素ラマンレーザーの周波数



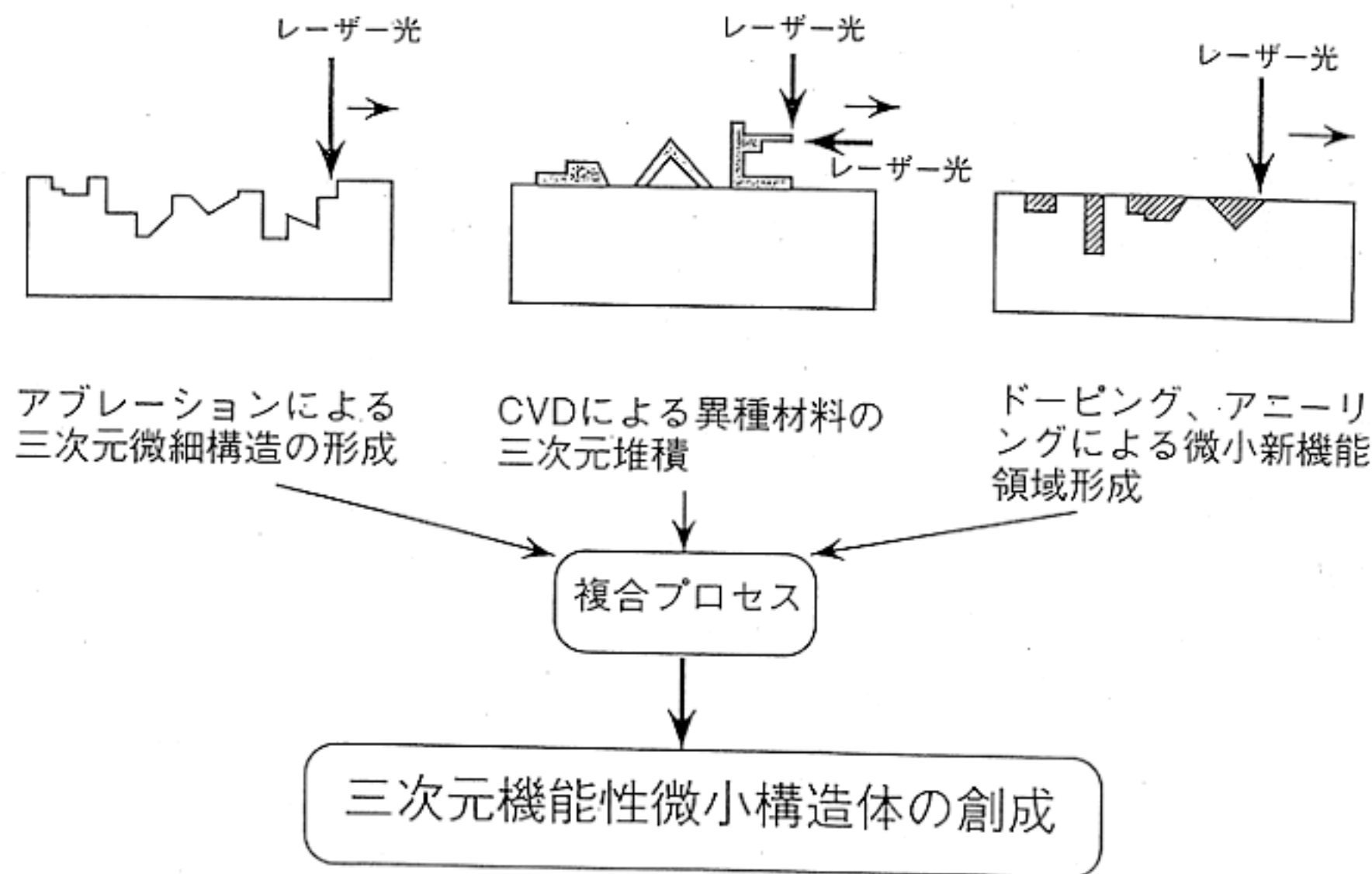
パラ水素・オルソ重水素ラマンレーザーの入出力特性



原子力基盤技術開発研究

1 原子力用レーザー技術の開発研究

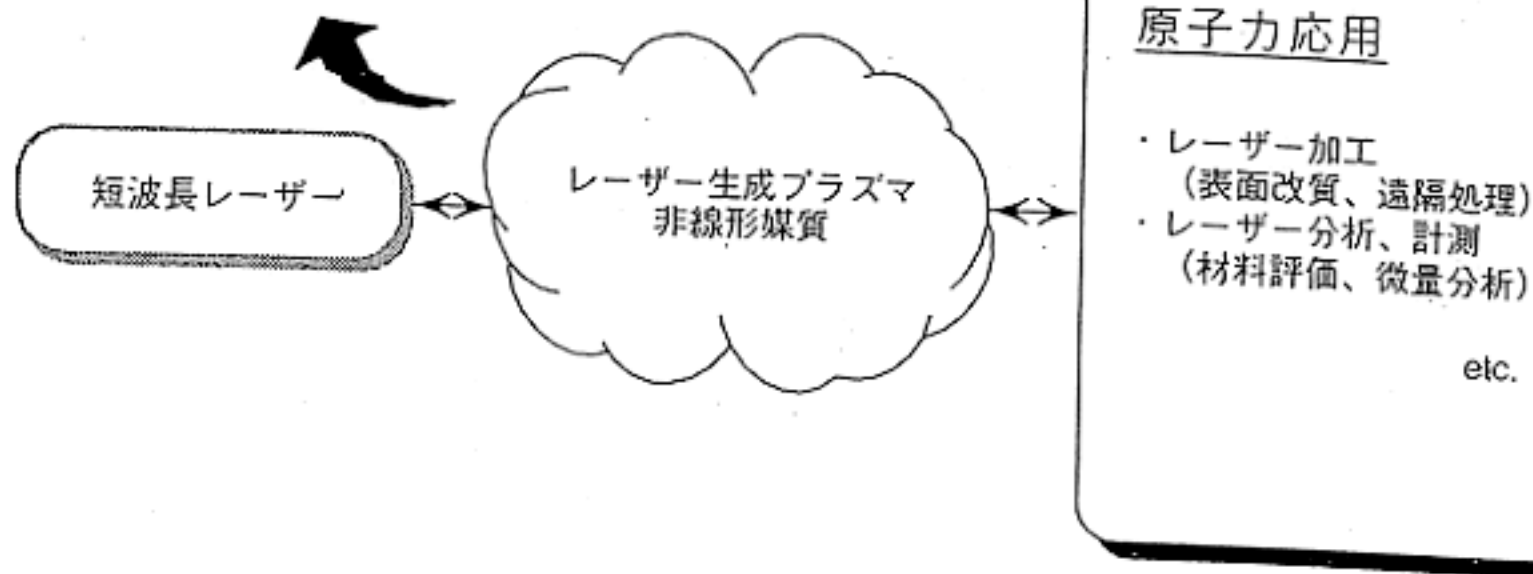
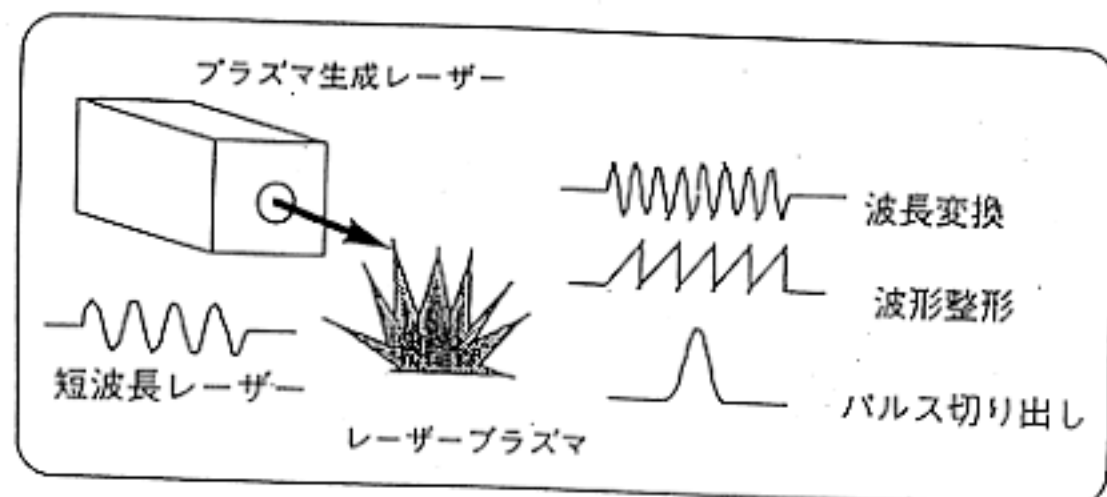
①短波長光源による機能性微小構造体の開発研究



原子力基盤技術開発研究

1 原子力用レーザー技術の開発研究

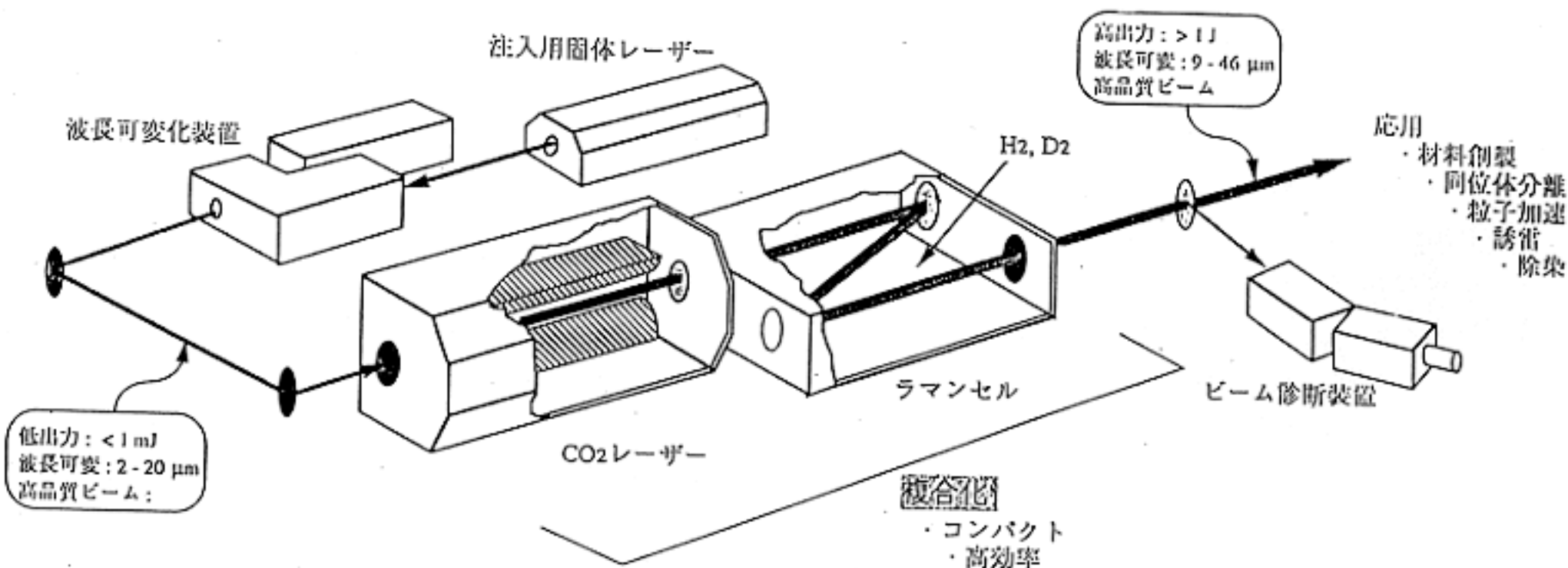
② X線非線形光学に関する研究



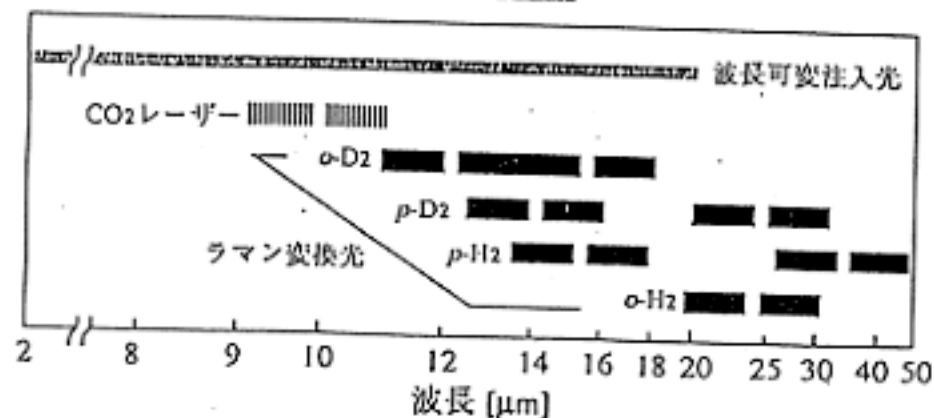
原子力基盤技術開発研究

1 原子力用レーザー技術の開発研究

③高効率複合型レーザーの開発研究



波長可変化



光束形状制御

注入光なし		低品質ビーム
注入光 ○		高品質ビーム ・ガウシアン
□		・非ガウシアン (矩形、etc)

原子力基盤技術開発研究

1 原子力用レーザー技術の開発研究

④原子力用ハードマテリアルレーザーの開発研究

【平成9年度までの成果】

---素材・電子的ハード---

- ・ハード素材 (Ga₂N) を用いた量子ドット形成： 試作に成功

---光学的ハード---

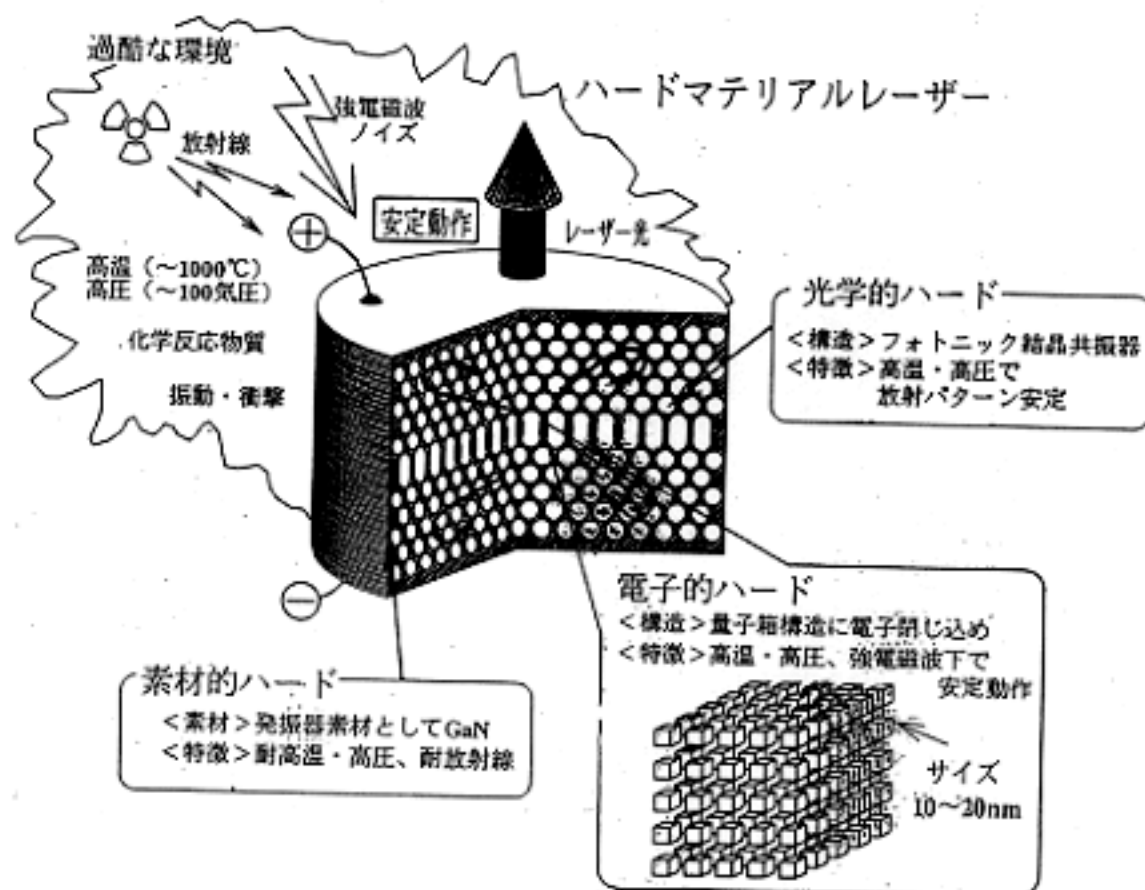
- ・フォトリック結晶レーザーの理論提案

【平成10年度の研究目標】

(レーザーデバイスへ適用を目的)

●ハード素材量子ドットの構造制御と光学特性の追求

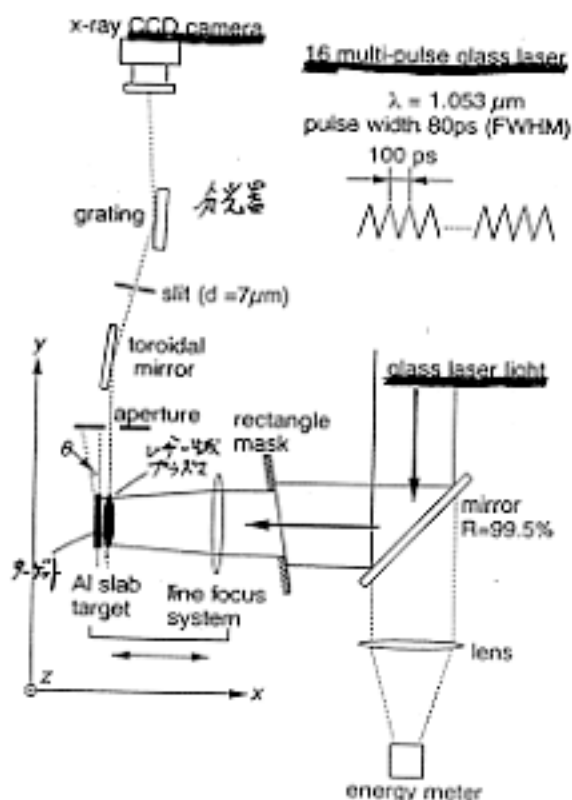
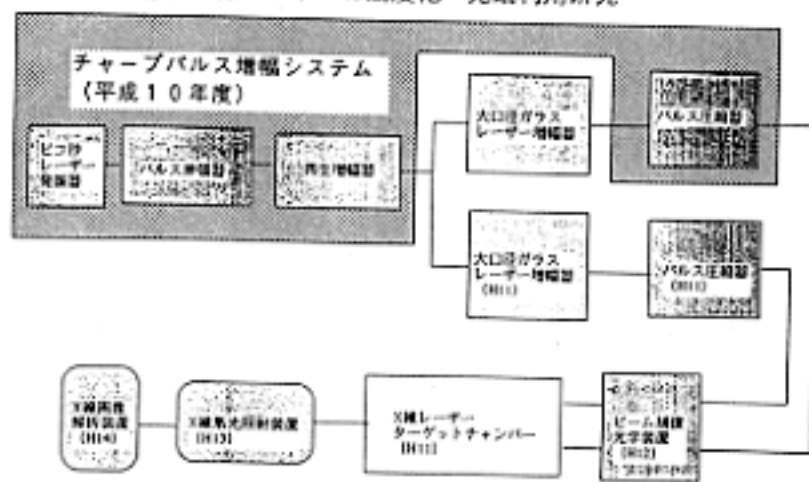
- ・サイズ制御、密度制御
- ・量子閉じ込め効果による光学特性の飛躍的な改善



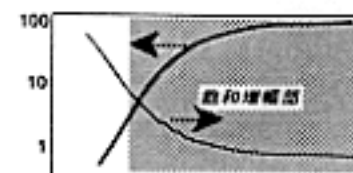
原子力基盤技術開発研究

1 原子力用レーザー技術の開発研究

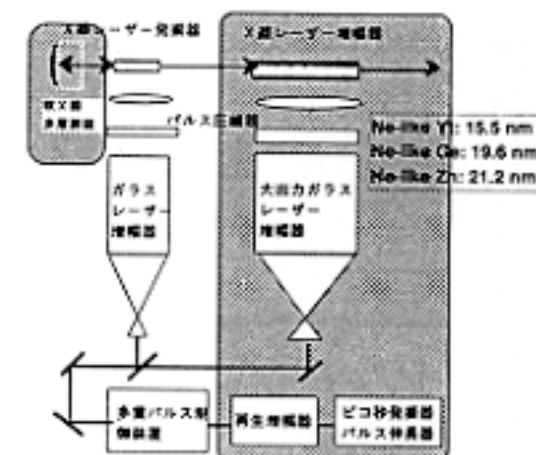
⑤軟X線レーザーの高度化・先端利用研究



X線レーザーの高度化



利得長
軟X線レーザー出力と利得長の関係



軟X線レーザーの高度化概念図

* 斜線部分が本研究で行う研究領域である

Micropatterning of lithium niobate using a Mesh Contact Mask



Multiwavelength irradiation



The 4th harmonics of Nd:YAG laser irradiation

原子力基盤技術開発研究

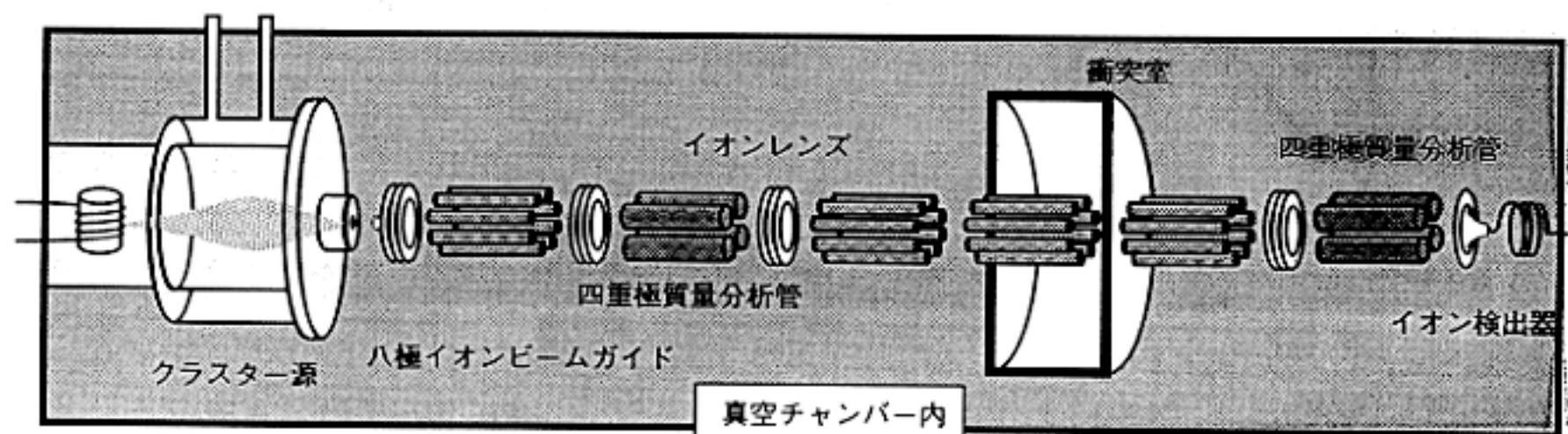
2 放射線リスク評価・低減化技術の研究開発

①放射性ナノ粒子の計測・制御研究〔新規〕

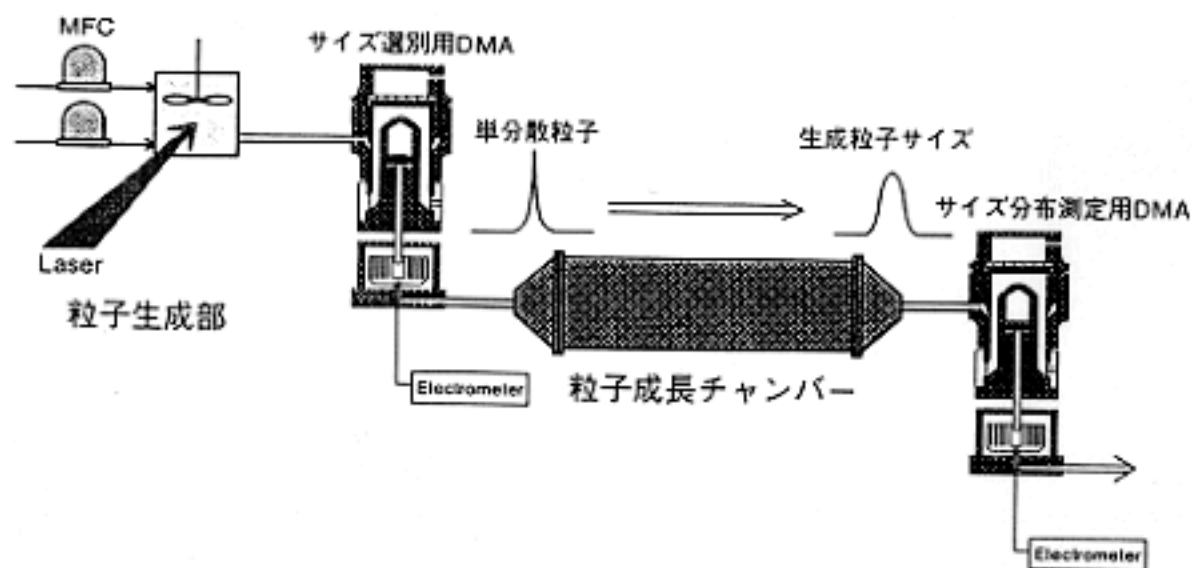
本提案のポイント

- 1) 研究室内から生まれたシーズ：ナノ粒子計測・制御技術
理研式分子法の中で生まれたクラスター技術
- 2) 工学的なニーズ：放射性物質取り扱い作業場、原子力施設内のエアロゾル除去
18号答申、原子力長計と合致
- 3) 方向づけ：未踏のナノ粒子科学分野の開拓
・1996年 JAPAN-US Workshop on NANOPARTICLE APPLICATION
・超微粒子・クラスター懇談会→学会へ
- 4) キーワード：①“成長ダイナミックスに目を向ける” → “サイズ選別” が重要
②“イオン核生成” との解明とその応用としてのナノ粒子除去
- 5) 波及効果

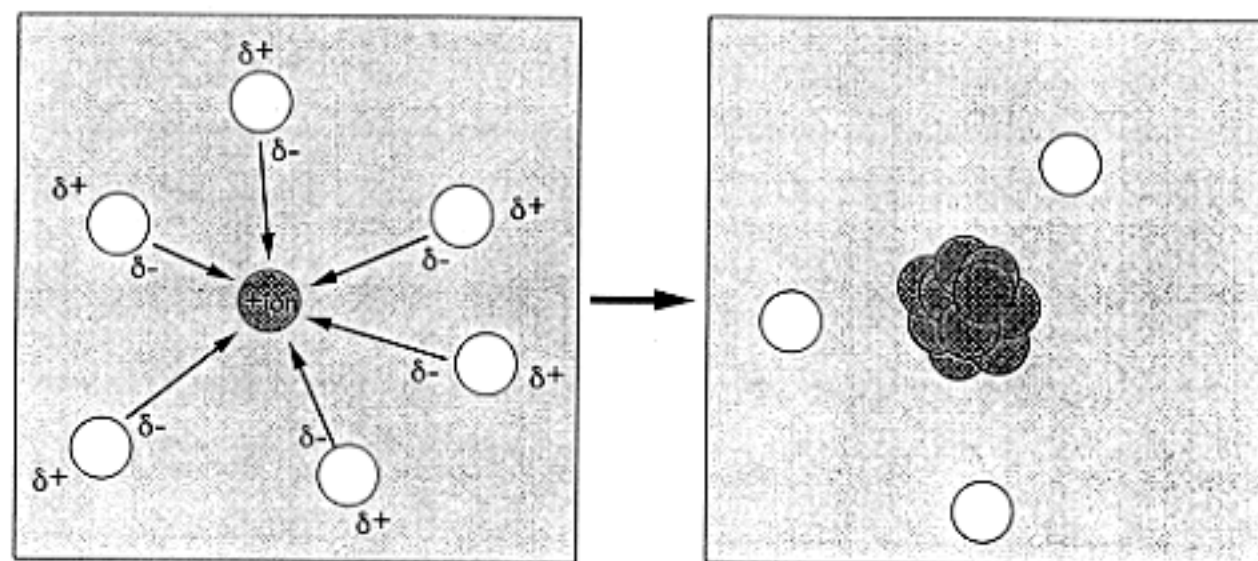
クラスター成長観測装置



ナノ粒子成長観測装置



イオン核生成の原理



① 自律型プラントのための分散協調知能化システムの開発

小型ロボット群による協調的保全技術の開発

(平成6年度～平成10年度)

目的 原子力プラントにおける保全(監視・診断・点検・修復)支援技術の開発

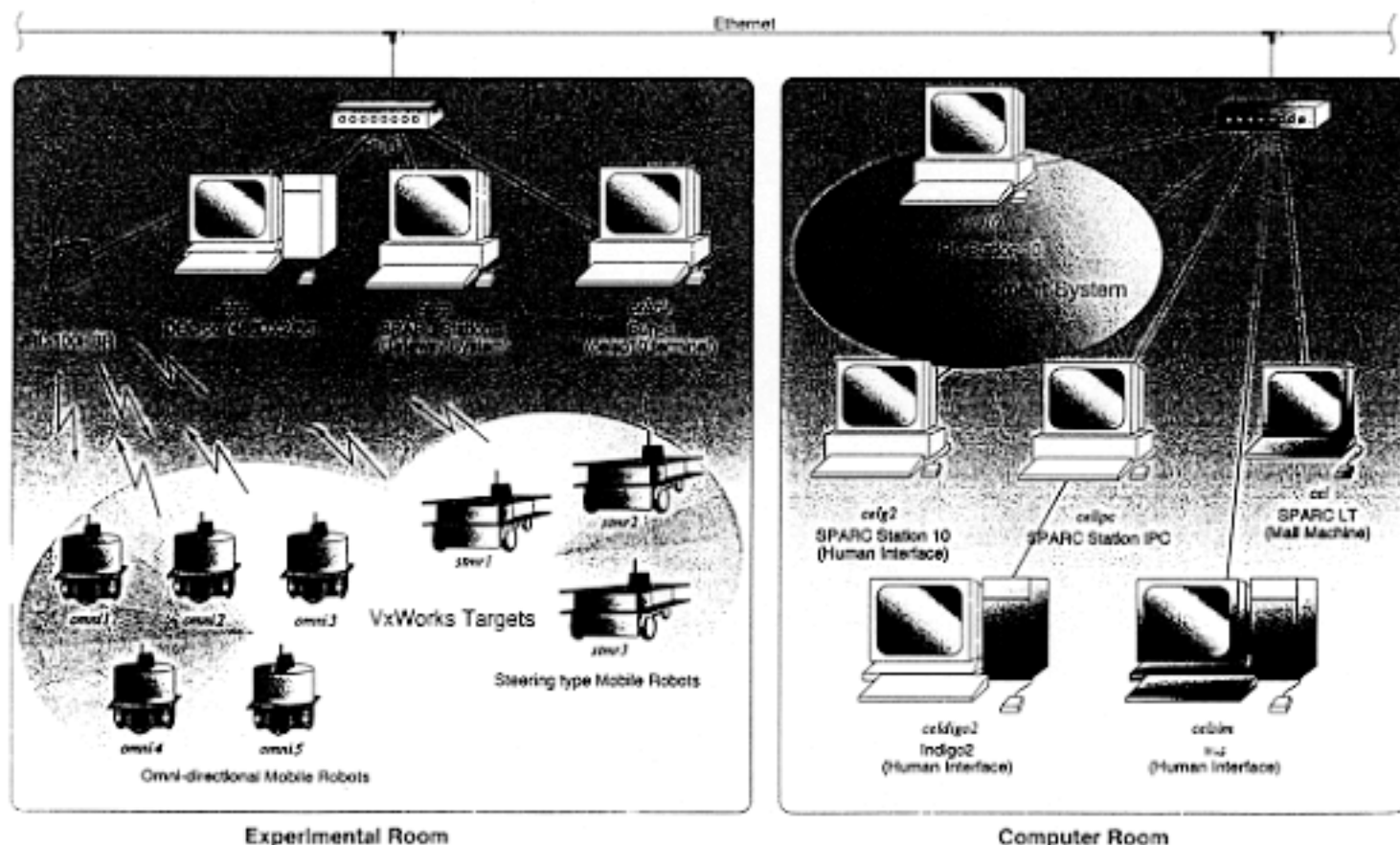
- ・ 保全作業計画技術の開発
- ・ 小型群知能ロボットシステムの開発



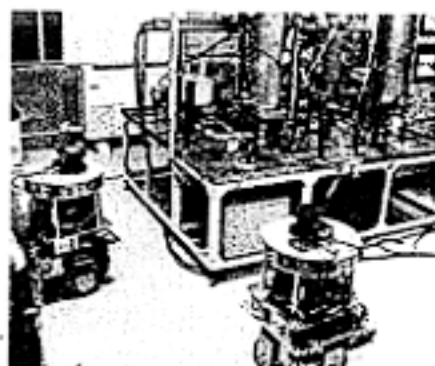
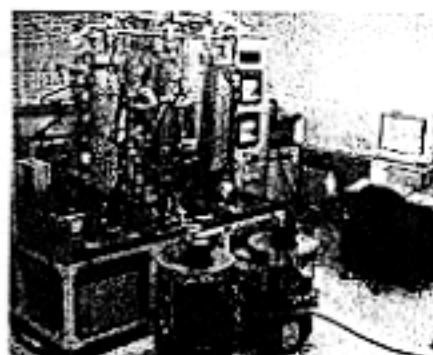
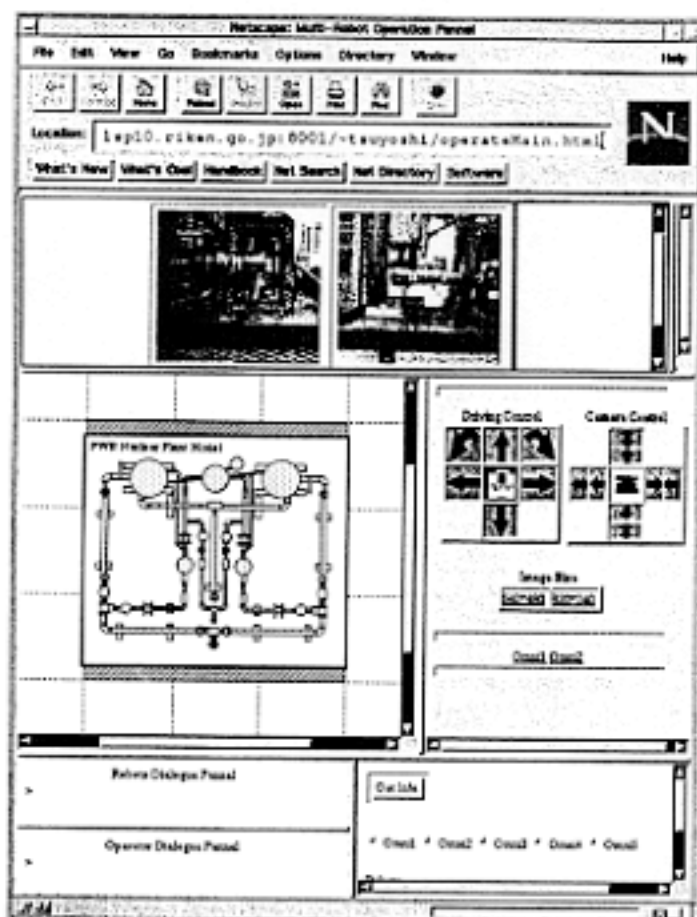
最終目標

- ・ 極限環境における作業要求への対処
- ・ 作業員の肉体的・精神的負担の軽減 (3 Kからの解放)
- ・ ヒューマンエラーの回避
- ・ プラントの信頼性・安全性の向上

10-1



System Configuration



保全作業計画

保全作業計画技術の開発

自律型プラントのための分散協調知能化システムの開発
(小型ロボット群による協調的保全技術の開発)
研究概念図

小型群知能ロボットシステムの開発

小型群知能ロボットシステムによる保全作業実行



共同研究：早稲田大学理工学部、
中央大学理工学部、
京都大学工学部、
東洋大学工学部、他

共同研究：東京大学工学部、名古屋大学工学部、
東洋大学工学部、東芝原子力技術研究所

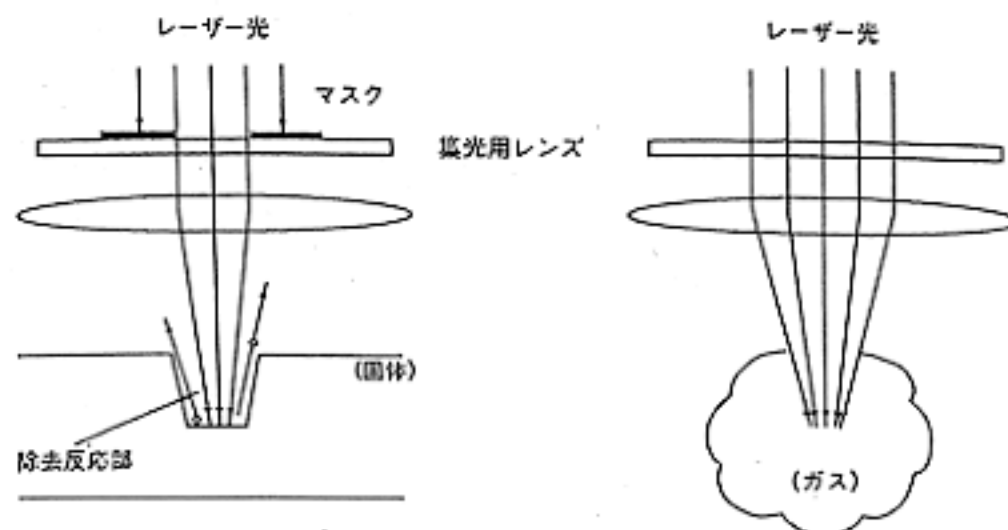
原子力基盤技術開発研究

3 原子力基盤技術総合的研究（クロスオーバー研究）

②原子力用レーザー実用化の研究開発

（高性能自由電子レーザーの光プロセッシングに関する研究）

高輝度、波長可変、高効率の特長を有する自由電子レーザーの利用技術を開発するため、各々の特長を有するレーザーを用いて、材料処理や微細加工の研究を行い、自由電子レーザー光と物質との相互作用に関するデータベースの構築を図る。



原子力基盤技術開発研究

3 原子力基盤技術総合的研究 (クロスオーバー研究)

③新たなDNA解析手法を応用した放射線突然変異の検出・解析技術の開発
(放射線により誘発される突然変異の特異性に関する研究)

1) DNA解析手法開発と変異の同定

各種放射線により誘導されたHPRT遺伝子変異クローンの収集

mRNAブライシング異常クローンの発見

SSCP法(電気泳動による変異検出)の改良と問題点の究明

2) 突然変異の原因となるDNA損傷の特性の同定(研究協力 長崎大学)

未成熟染色体(PCC)切断数による放射線リスクの推定

PCC-FISH法による染色体異常生成メカニズムの解明

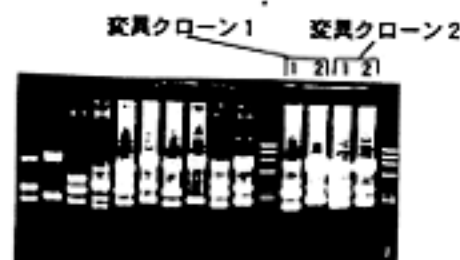
3) 放射線高感受性遺伝子の研究(研究協力 大阪大学)

細胞間期死、個体死、がんに対する放射線感受性を決定する遺伝子群の検索

DNA損傷修復異常に関与する遺伝子の導入によるマウスの白血病発生

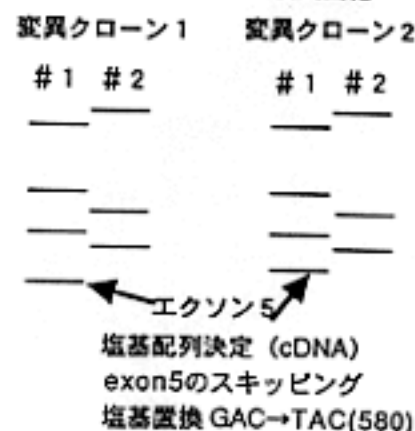
放射線によるHPRT変異の解析結果、上記トピックの他に放射線の種類やエネルギーの違いで誘発される変異の特性の異なることが明らかになった。変異の一例を示す。

ゲノムDNAの多重PCRによる
変異クローンの解析(電気泳動)



変異クローン 多重PCR(ゲノムDNA)
1 exon5の部分欠損
2 正常

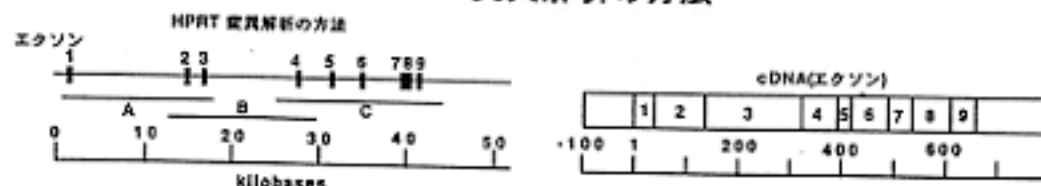
左の結果の一部の模式図化



確認の実験結果: 変異クローン1のゲノムDNAの塩基配列決定

TTGTACTGATTTTCATTTCTCCTTCTAGATGCTCTTGATTGTGGAAGTAAGTTCACA
26bp deletion exon 5

HPRT 変異解析の方法

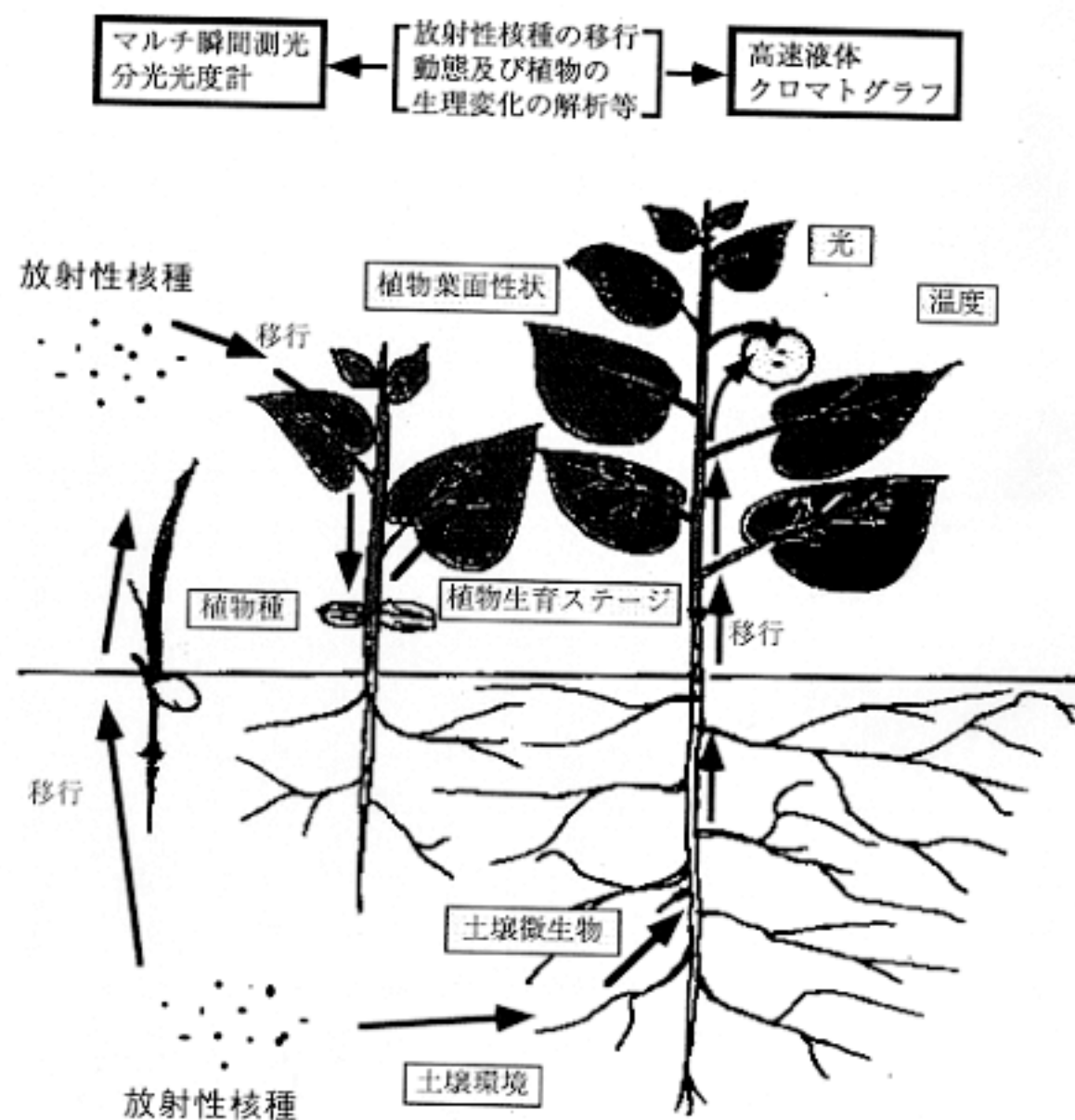


テーマ	平成9年計画	平成10年計画
1)	Long PCR法による大きな欠失を伴う突然変異の解析	AFMによるDNA構造異常として突然変異を検出する可能性の検討
2)	染色体異常が後天的な影響の原因となる可能性の検討	染色体異常と突然変異の関連性の検討
3)	SCID マウス (DNA修復遺伝子異常) が微量放射線により高率する可能性の検討	DNA損傷修復異常の細胞間期死、個体死、白血病への関与についての総合的検討

Ⅳ. 原子力基盤技術開発研究

3 原子力基盤技術総合的研究（クロスオーバー研究）

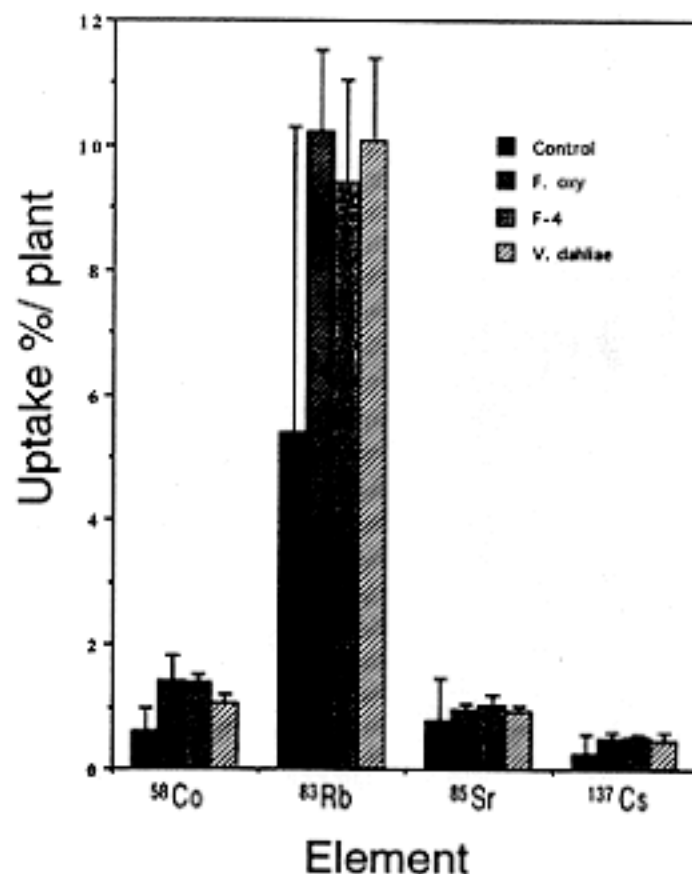
④陸域環境における放射性核種の移行に関する動的解析モデルの開発



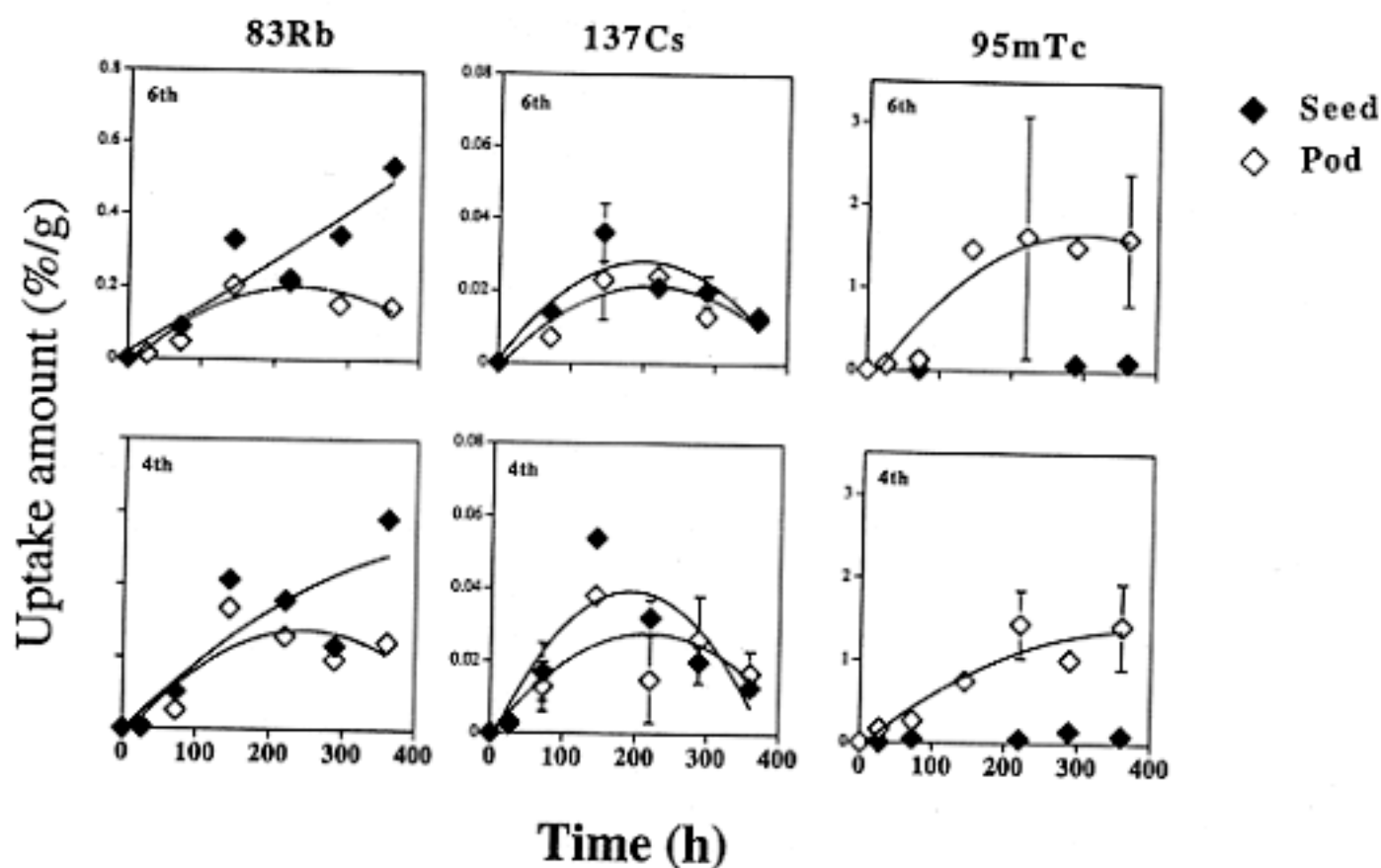
Top five of plant species showing high uptake rates for each nuclide

Nuclide	Plant	Percentage uptake per plant
^{60}Co	Broccoli	(1.22 ± 0.0)
	Tomato	(1.02 ± 0.0)
	Eggplant	(0.51 ± 0.2)
	Chinese cabbage	(0.41 ± 0.1)
	Turnip (Hinona)	(0.37 ± 0.2)
^{83}Rb	Tomato	(25.6 ± 0.1)
	Chard	(17.8 ± 3.1)
	Sun flower	(17.2 ± 4.1)
	Yam-motaka	(14.2 ± 2.1)
	Maize	(14.0 ± 6.2)
^{85}Sr	Tomato	(2.12 ± 0.3)
	Sunflower	(1.36 ± 0.3)
	Turnip (Kyona)	(0.98 ± 0.2)
	Broccoli	(0.81 ± 0.0)
	Turnip (Komatsuna)	(0.79 ± 0.1)
^{137}Cs	Tomato	(1.42 ± 0.3)
	Chard	(1.36 ± 0.3)
	Yam-motaka	(1.09 ± 0.3)
	Pea	(0.51 ± 0.1)
	Maize	(0.38 ± 0.1)

Uptake of Co, Rb, Sr and Cs by Tomato with symbiotic fungi



Uptake and translocation of Rb, Cs, and Tc in fruits of soybean plant



$$A_r = c + k_1 t + k_2 t^2$$

$$0 < t \leq x,$$

where

A : amount of radionuclide r , c : constant, t : time (h),
 k_1, k_2 : coefficient of t and t^2 , and x : 360 h in this study.

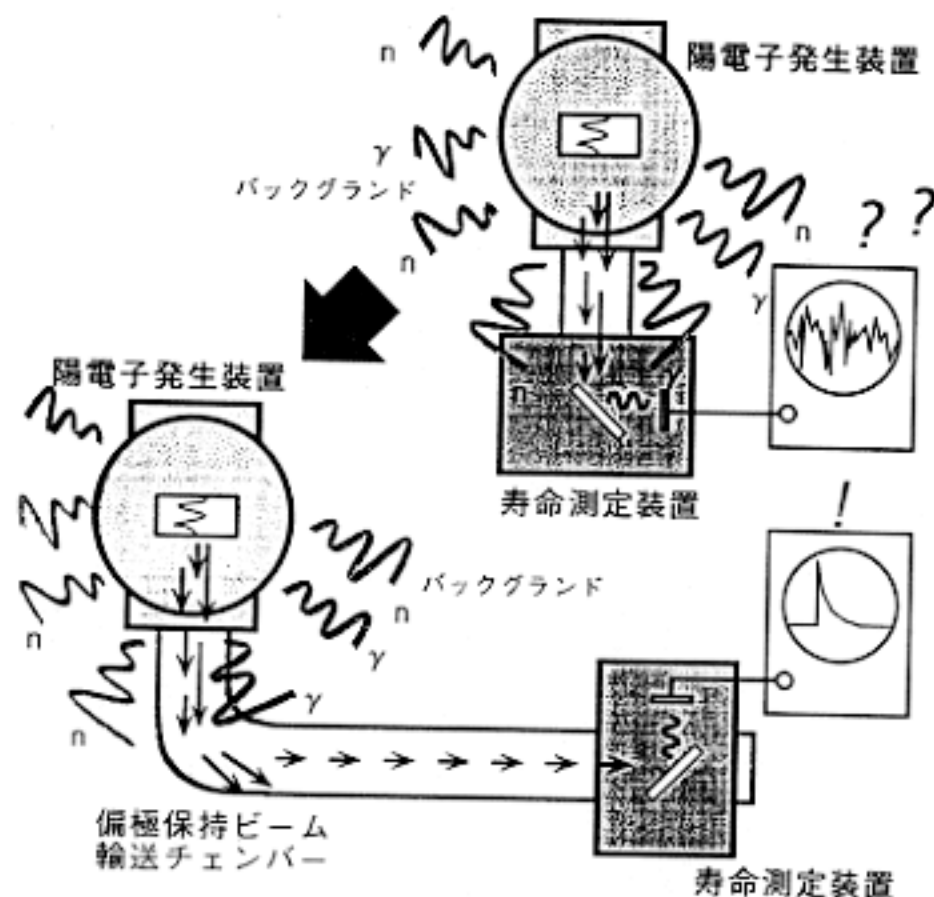
$t_{Ar \max}$ is calculated from

$$dA_r/dt = 0$$

The uptake rate (%/h) at the time t is expressed by

$$dA_r/dt$$

偏極陽電子の高精度利用環境



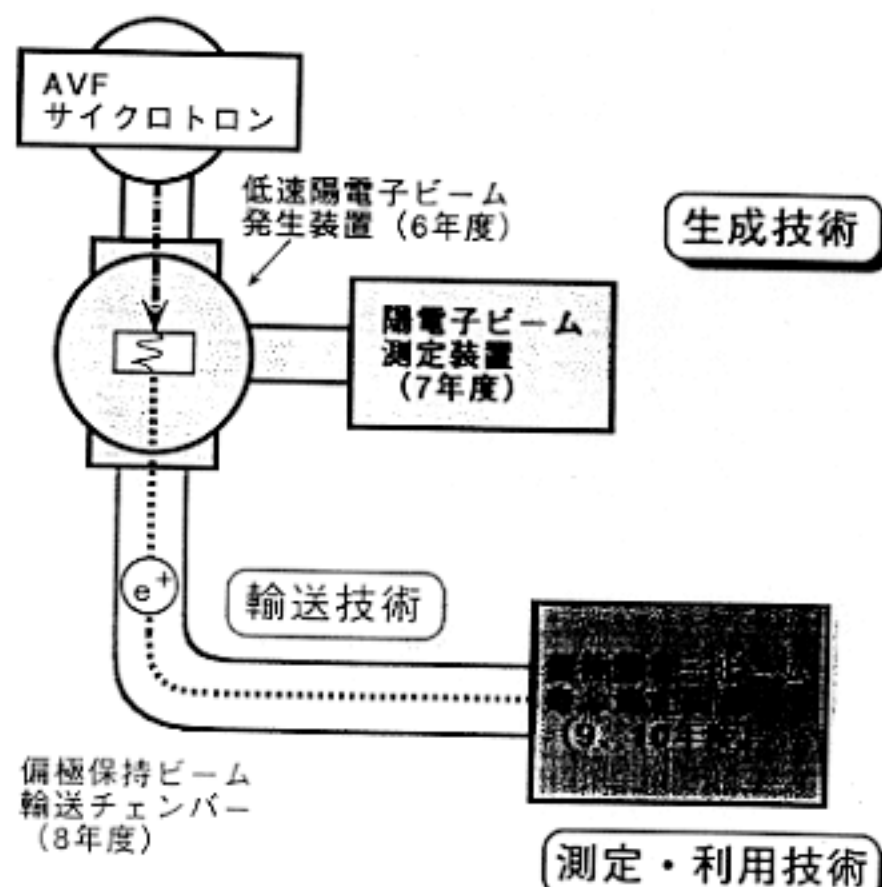
高精度利用環境

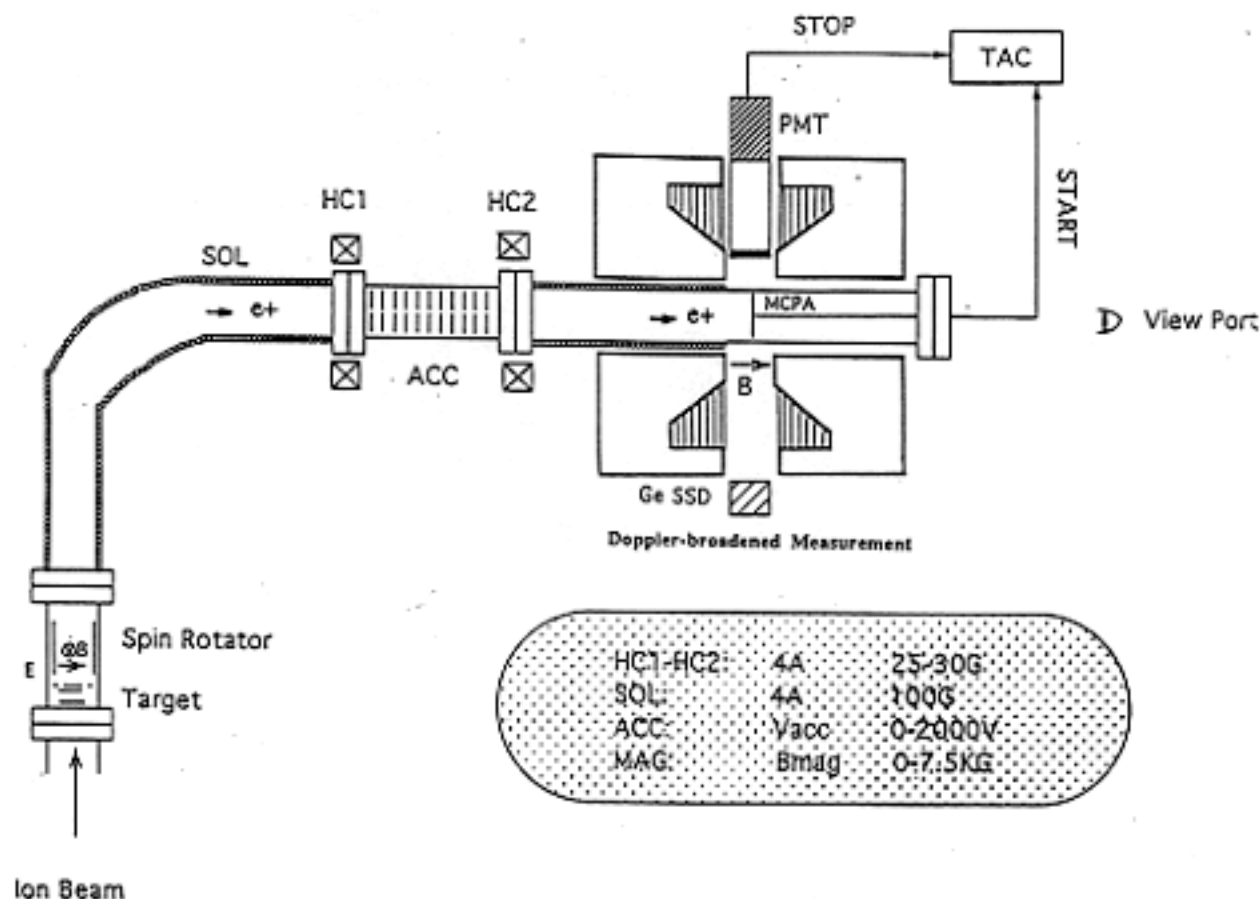
半導体検出器など放射線に弱い高分解能検出器の使用が可能になる

二次電子を利用した偏極陽電子ビームによる寿命測定などの新測定技術の研究基盤が出来る

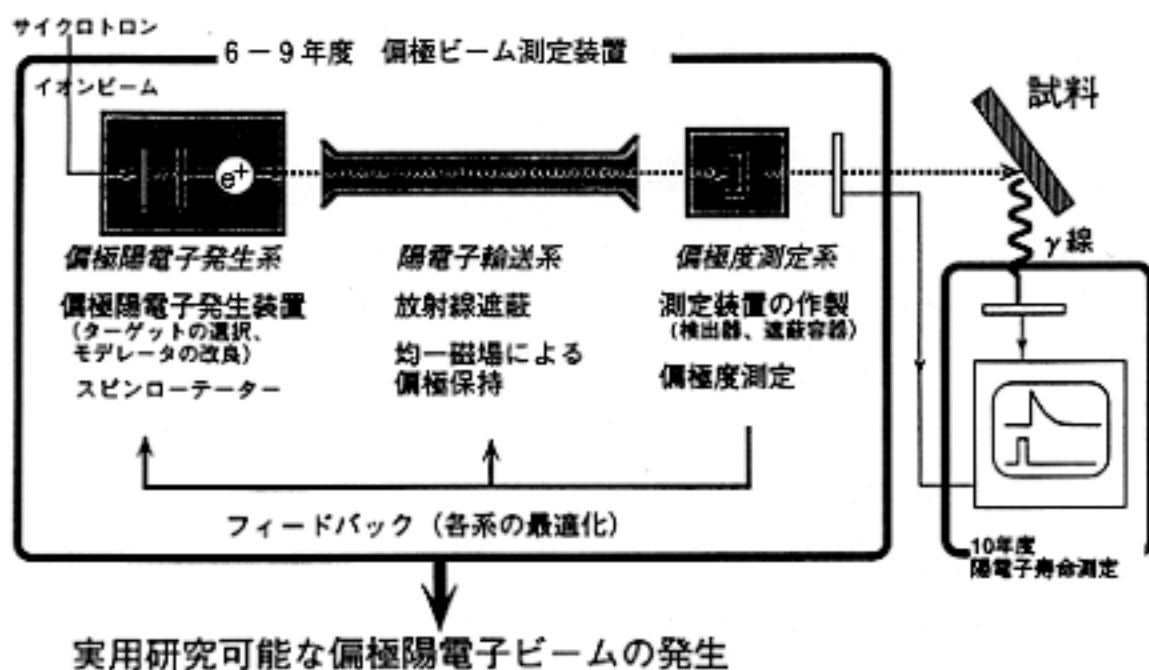
単色化による空間分解能の向上により最表面の解析への利用が可能になる

偏極陽電子ビーム計画





10年度研究計画 偏極陽電子ビームの発生と測定技術の確立



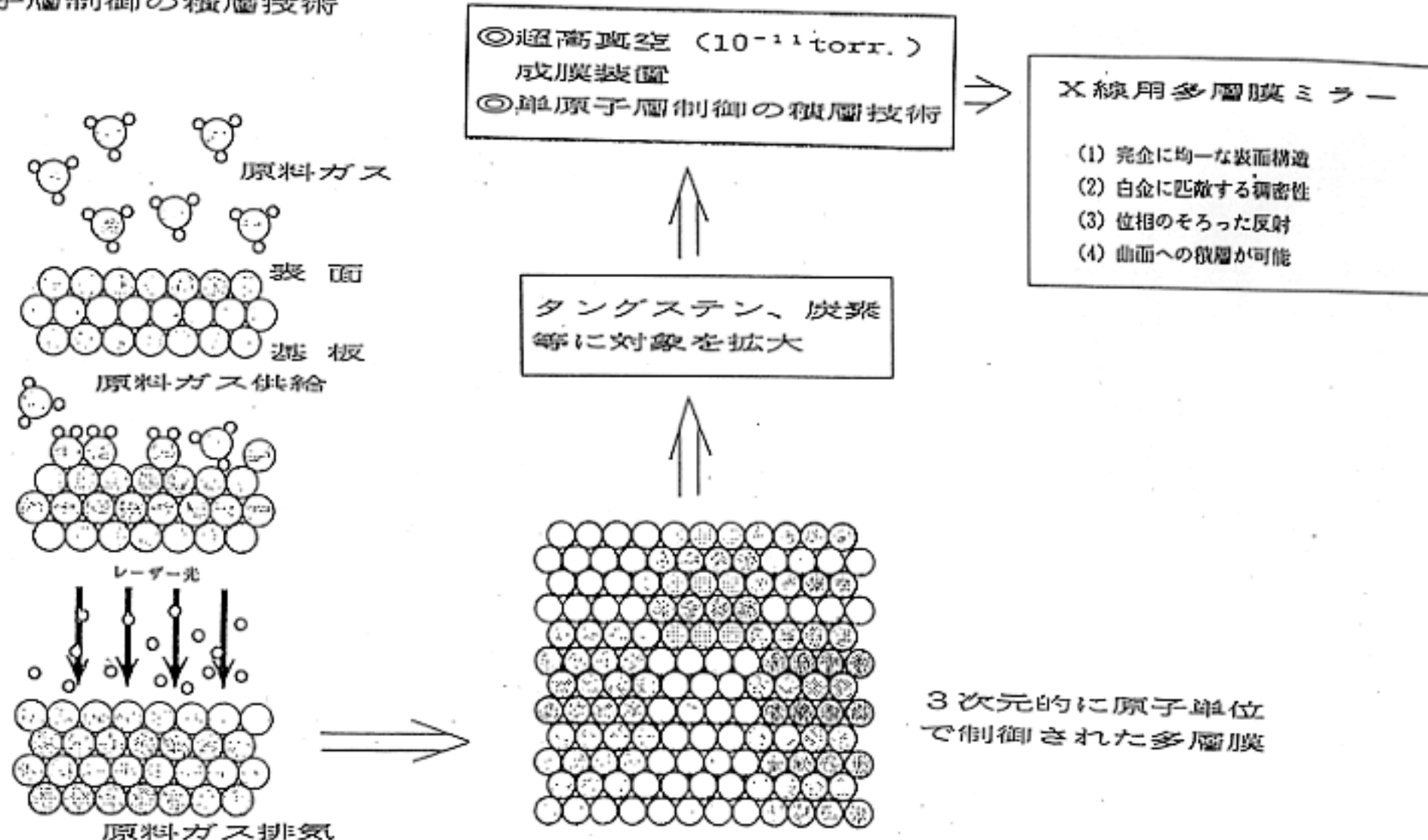
原子力基盤技術開発研究

3 原子力基盤技術総合的研究 (クロスオーバー研究)

⑥高輝度放射光の先端利用のための基盤技術の研究開発

(単原子層制御の積層技術を利用した多層膜ミラーの製作技術の研究開発)

単原子層制御の積層技術



原子力基盤技術開発研究

3 原子力基盤技術総合的研究（クロスオーバー研究）

⑦ 原子力用構造物の巨視的／微視的損傷の 計算力学的解析法の開発とその応用

研究の目的

加工・組立工程で受ける変形や熱によって材料には残留応力や強度の不均一が生じる。これらは、原子力構造物の破壊強度に大きな影響を与える。本研究は、加工と熱の履歴を正確に評価しながら構造物の破壊強度に関する高精度シミュレーションが行える様な、高度な有限要素法（FEM）ソフトウェア基礎技術の開発を目的とする。

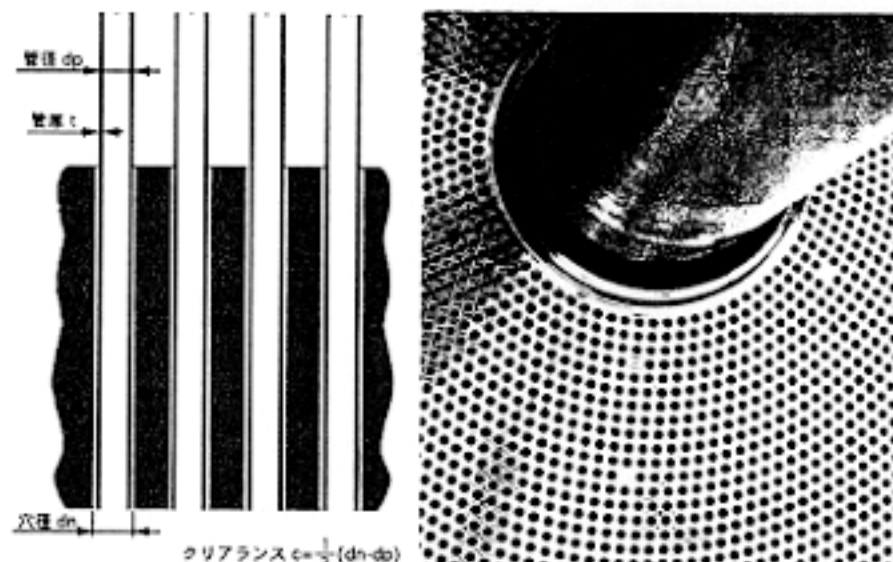
平成9年度までの研究成果

1. 非線形弾塑性 FEM の領域分割法による並列化
2. 異方性弾塑性構成式の FEM プログラムへの
導入手法の開発
3. 熱－弾塑性連成 FEM 手法の開発

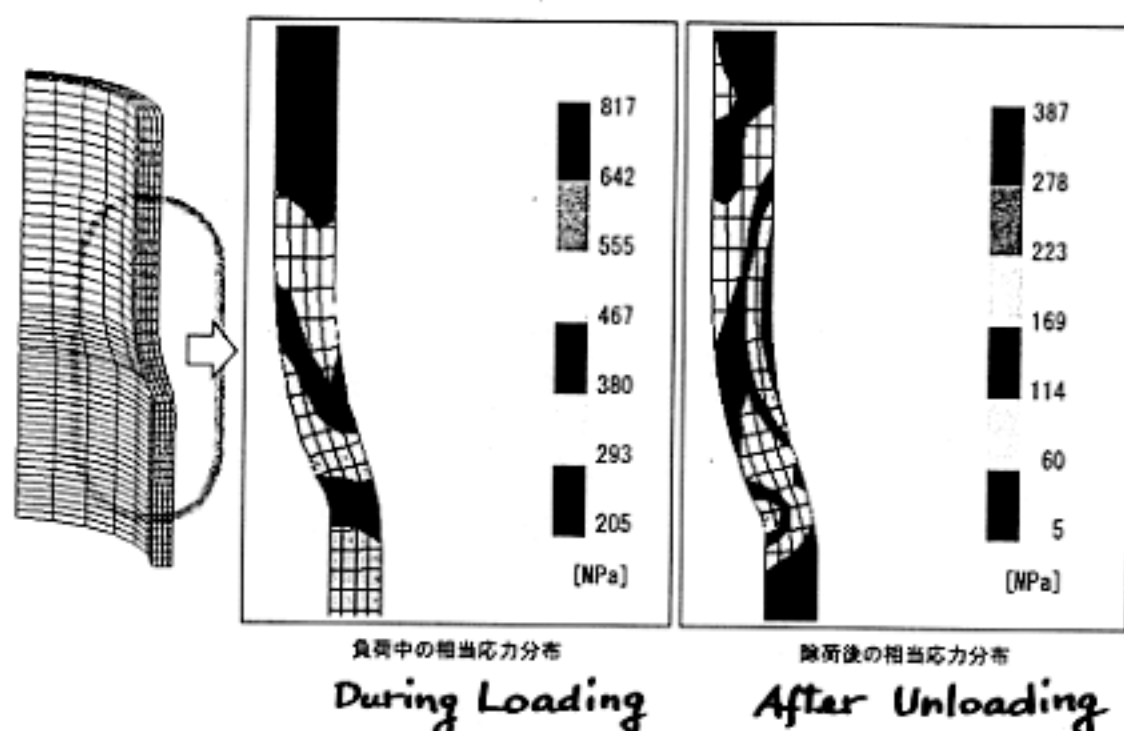
平成10年度の研究計画

1. オブジェクト手法による異なるプログラム・
異種計算機を用いた並列計算手法の開発
2. 熱交換器管板への伝熱管取付け過程の3次元
大規模シミュレーション

高速増殖炉の熱交換器管板への 伝熱管取付け過程の例

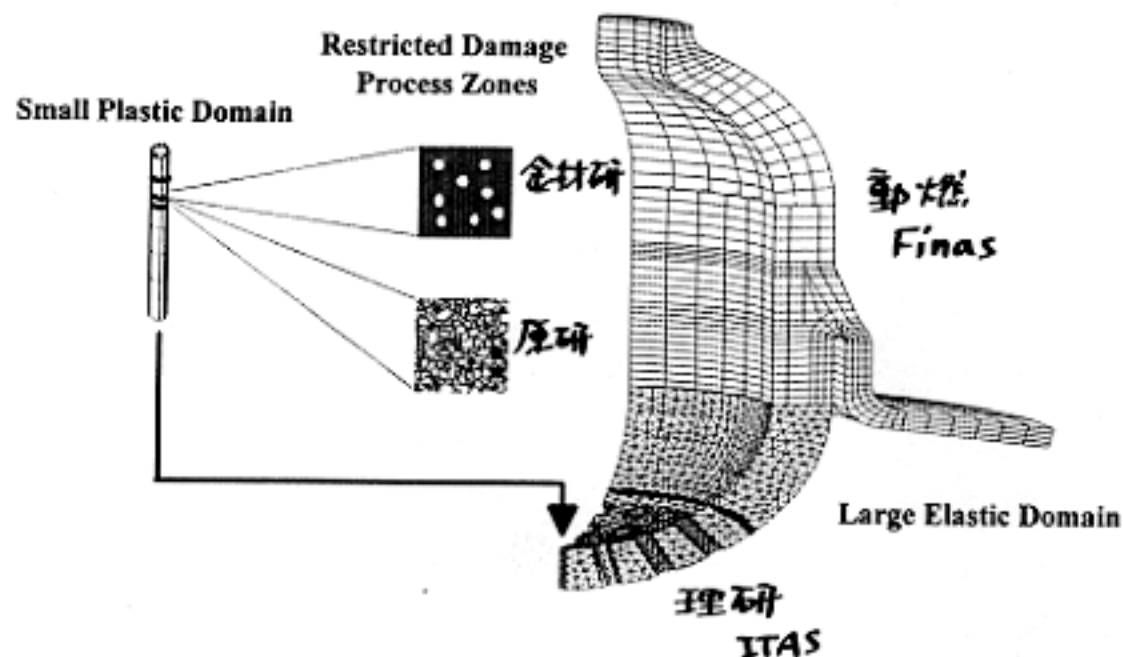


Distribution of Mises Stress in Tube Expansion

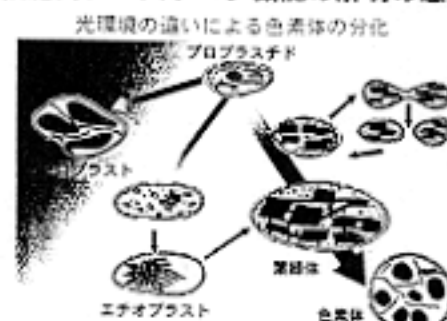


オブジェクト化されたインターフェース・ネットワークによる連成計算

Tube to Tubesheet Structure in Nuclear Plants

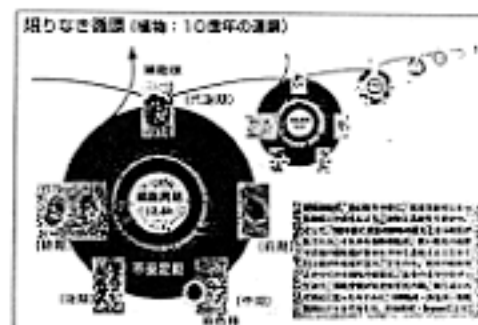


細胞内クロストーク機能の解明の意義



高等植物の全ての器官形成に染色体分化がかかる
それぞれの分化過程で核と染色体のクロストークが決定的に機能する

細胞周期と植物の進化



重イオンビームの特性により不安定期の遺伝子 (DNA分子) に影響を与える→効率的に突然変異体を作る

植物受精卵は突然変異誘発実験に適する



受精後に卵細胞は速急に非対称分裂を開始し、初期胚を形成する (遺伝子の不安定状態が頻発する)
閉鎖個体を種子として保存できる
胚乳部分の損傷は栄養地帯で発芽させることにより克服できる

花の中で次世代への細胞分裂が始まる



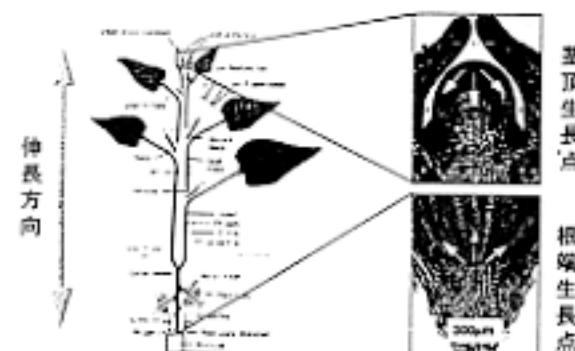
重イオンビーム効果は絶大

タバコ、Kanto品種の場合

照射時期 (時間)	照射後初期 芽生体数 (本)	芽生体数 (本)	芽生体率 (%)	照射後中期 芽生体数 (本)	芽生体率 (%)
10-48	1524	46	3.01	147	9.63
48-72	1935	29	1.50	45	2.33
72-96	986	6	0.61	5	0.5

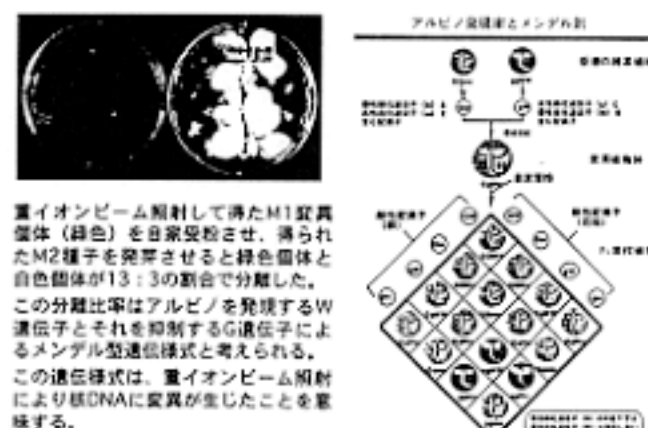


成長時にも数個の細胞が植物体の性質を決める



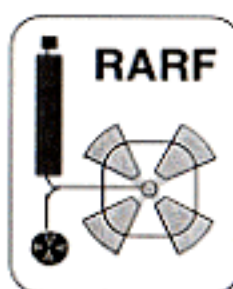
植物成長は2次元、動物成長は3次元

遺伝様式から変異DNA種が分かる



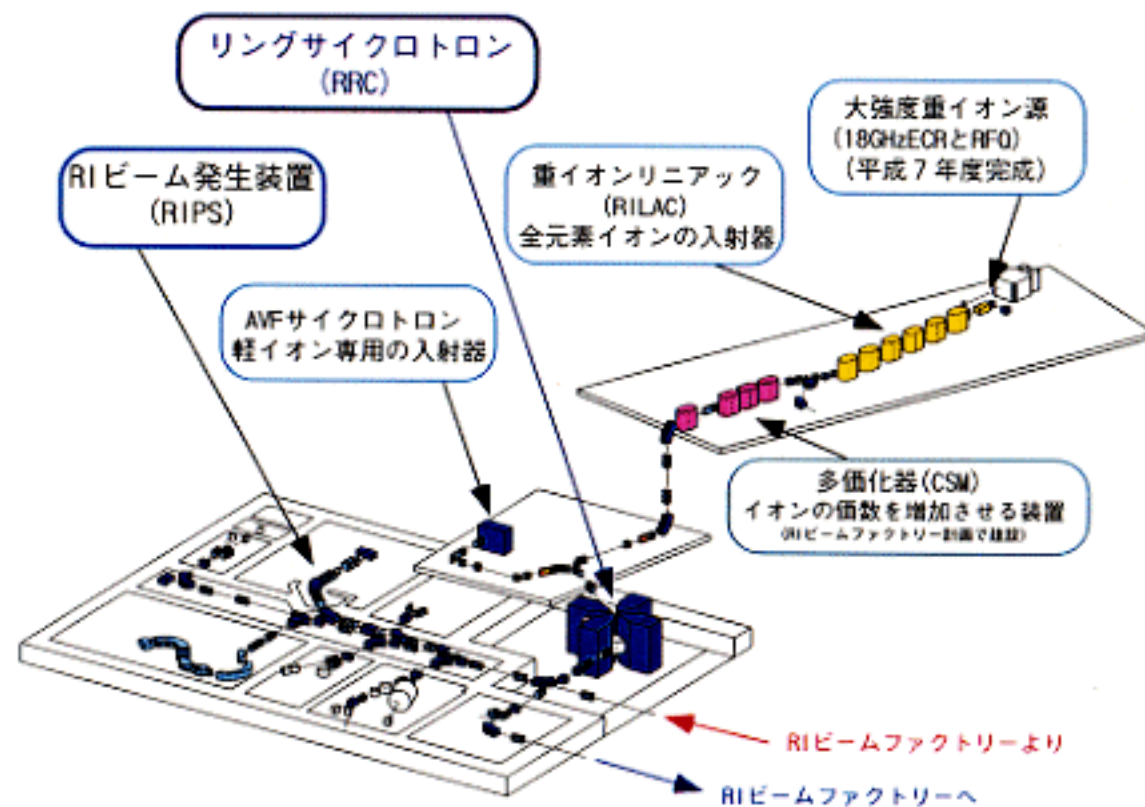
重イオンは生物科学の新展開を示唆する





RIKEN
ACCELERATOR
RESEARCH
FACILITY

理研加速器研究施設 (1986年12月リングサイクロトロン始動)

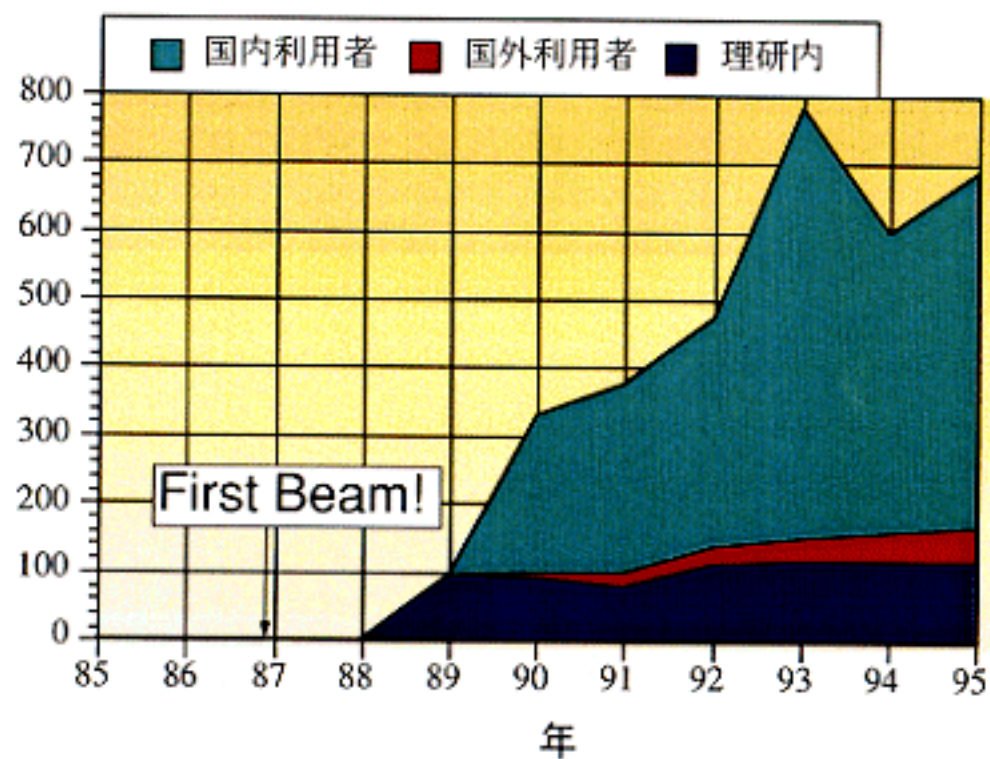


RARFのビーム

- 大強度・高エネルギー・高品質・連続重イオンビーム
(世界最大級ビームパワー)
- RIビーム (強度で世界水準の1～2ケタ上回る)
- 偏極 RI (重イオン) ビーム (世界で唯一)
- 偏極重陽子ビーム (世界で唯一偏極軸の方向を自由自在に変えられる)
- 中性子ビーム
- 偏極中性子ビーム
- 高電離重イオンビーム
- 低速陽電子ビーム
- (ミュオンビーム) ⇒ RALへ展開

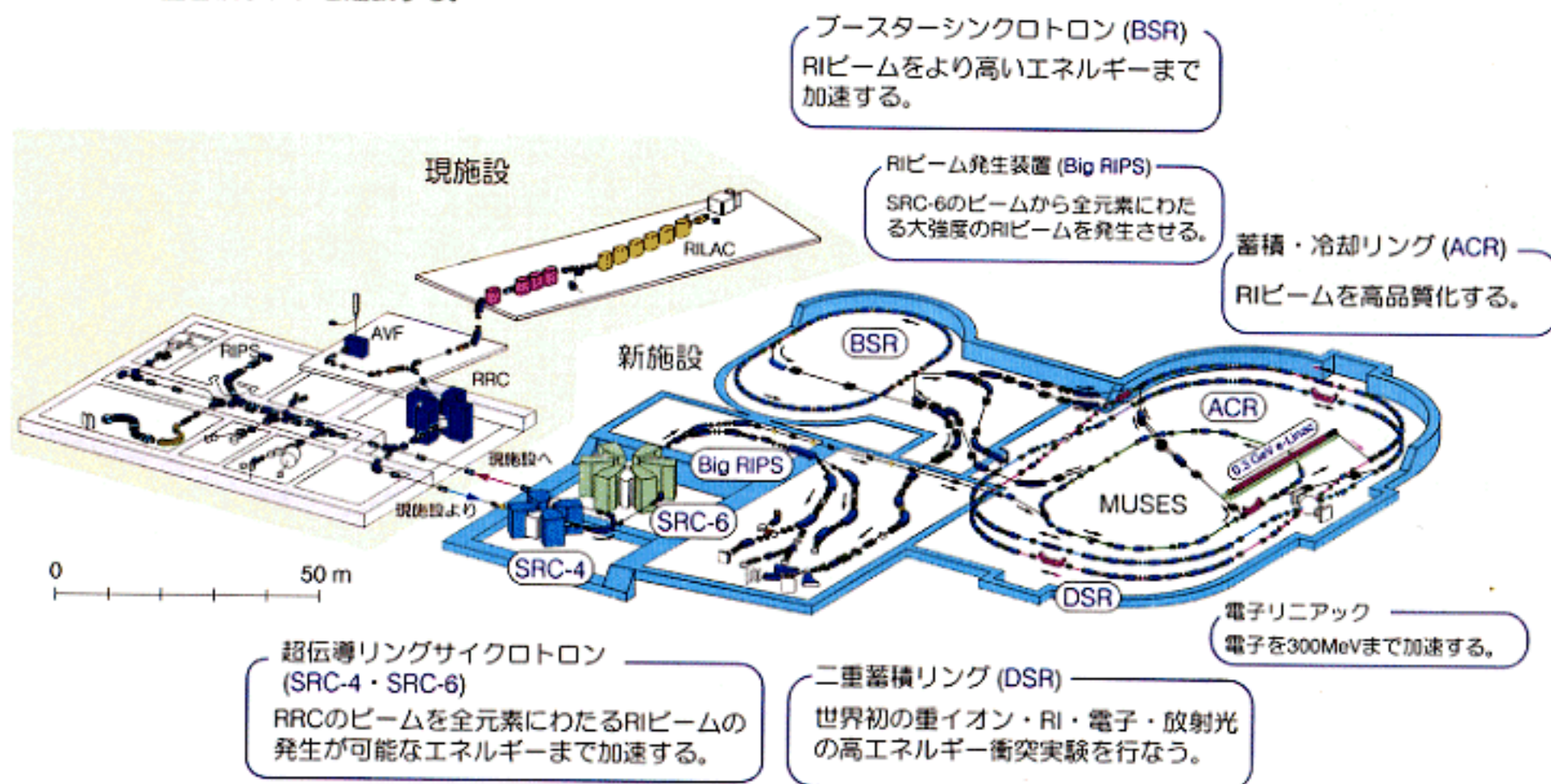
理研リングサイクロトロン (RRC) の利用状況

理研リングサイクロトロン利用者数



RIビームファクトリー概念図

現施設を拡張し、2基の超伝導リングサイクロトロン、蓄積・冷却リング、ブースターシンクロトロン、二重蓄積リングを建設する。



R I ビームファクトリーの性能と特徴 —独創的な加速器の構成—

S R Cによって

- **世界最大強度**の R I ビームを得ることができる。
- 全元素にわたる約 **3 0 0 0 核種**の R I ビームを利用することができる。

A C Rおよび **B S R**によって

- **世界最高エネルギーかつ高品質**な R I ビームを利用することができる。
- R I ビームのさらなる加速および減速が可能である。

D S Rによって

- 世界初の重イオン、電子、放射光と R I ビームとの衝突実験が可能である。

理研加速器研究施設のこれまでの成果

§ 原子核物理

- ・新同位元素 (^{10}He , ^{31}Ne , ^{37}Mg , ^{38}Mg , ^{40}Al , ^{41}Al など 13 種類)
- ・天体核物理 ($^8\text{Li}(\alpha, n)^{11}\text{B}$, $^{13}\text{N}(p, \gamma)^{14}\text{O}$, $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$, ...etc.)
- ・中性子ハロー (^{11}Li , ^{11}Be , ^{14}Be)
- ・中性子スキン (^6He , ^8He)
- ・超重元素の合成 ($^{232}\text{Th}(^{40}\text{Ar}, \alpha 2n)^{266}\text{106}$)
- ・偏極 RI ビーム (^9C , ^{13}O , ^{14}B , ^{15}B , ^{17}B , ^{17}N , ^{21}F)
- ・高スピンアイソマービーム ($^{174}\text{mHf}(8^-)$, $^{148}\text{mTb}(27^+)$)
- ・高温原子核の双極子巨大共鳴
- ・軽イオンビームによる荷電交換反応
- ・(偏極 $d, ^2\text{He}$) 反応によるスピン-アイソスピン励起
- ・偏極 ^3He (偏極 d, d) ^3He 反応による核力の精密測定
- ・高速レーザー核分光法

§ 核化学

- ・マルチトレーサーの利用
- ・RI ビームによるインビームメスbauer分光

§ 物質科学

- ・酸化物高温超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ の H_c - J_c の改良
- ・偏極 RI ビームとベータ線NMRによる局所電磁場の新測定法
- ・整列高スピンアイソマービームとガンマ線摂動角相関法による物性の新測定法

§ 生物・医学

- ・重イオンがん治療法の基礎研究 (放射線医学総合研究所との共同研究)
- ・陽電子放出 RI ビームと PETを用いる新しいがん治療法
- ・重イオンビーム受粉期照射変異処理法による新植物機能の開発

RI ビームファクトリーで期待される成果

- ・1000種類の新同位元素の発見
- ・宇宙における元素合成過程の全解明
- ・2000種類のエキゾチック原子核の構造研究
- ・中性子物質・中性子星の構造研究
- ・新超重元素ジャポニウム (Jp) の創成
- ・不安定核の磁気能率・四重極能率の全測定
- ・超変形核の創成

・短寿命不安定核の新X線分光研究

- ・マルチトレーサーの多角的利用
- ・エキゾチック核化学研究

- ・酸化物高温超伝導体の実用化研究
- ・酸化物高温超伝導体等の構造研究
- ・物性研究の新手法

- ・生物研究の新手法
- ・次世代の食料生産・環境保全技術の開発

理研加速器研究施設の技術開発

§ イオン源および標的

- ・電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 重イオン源の改良
 - ・プラズマカソード法の発明
 - ・アルミナコーティング法の発明
 - ・有機金属化合物供給法の発明
 - ・電気泳動によるCa 48濃縮法の開発
 - ・アフターグロー法の開発
 - ・18GHz世界最大強度イオン源の完成
- ・偏極重陽子源の開発
- ・偏極He 3標的の完成
- ・ビーム同期型回転標的の完成

§ 重イオン線型加速器の改良

- ・周波数可変型高周波四重極ライナックの発明
- ・アクティブ荷電変換器の発明

§ リングサイクロトロン改良

- ・偏心加速法による完全準軌道ビーム取り出し法の発明

§ RIビーム発生装置の改良

- ・液体Heフリー型超伝導ソレノイドによる0.3mmφビームスポットの実現

§ 超伝導セクター電磁石の開発

- ・プロトタイプの製作

§ 検出器の開発

- ・極低バックグラウンドX線検出器の発明

RIビームファクトリーで期待される性能

- ・世界最大強度の重イオンパルスビームの実現
- ・世界最大強度の重イオンビームの実現
- ・世界最大強度の偏極重陽子ビームの実現

- ・世界最大強度のRIビームの実現

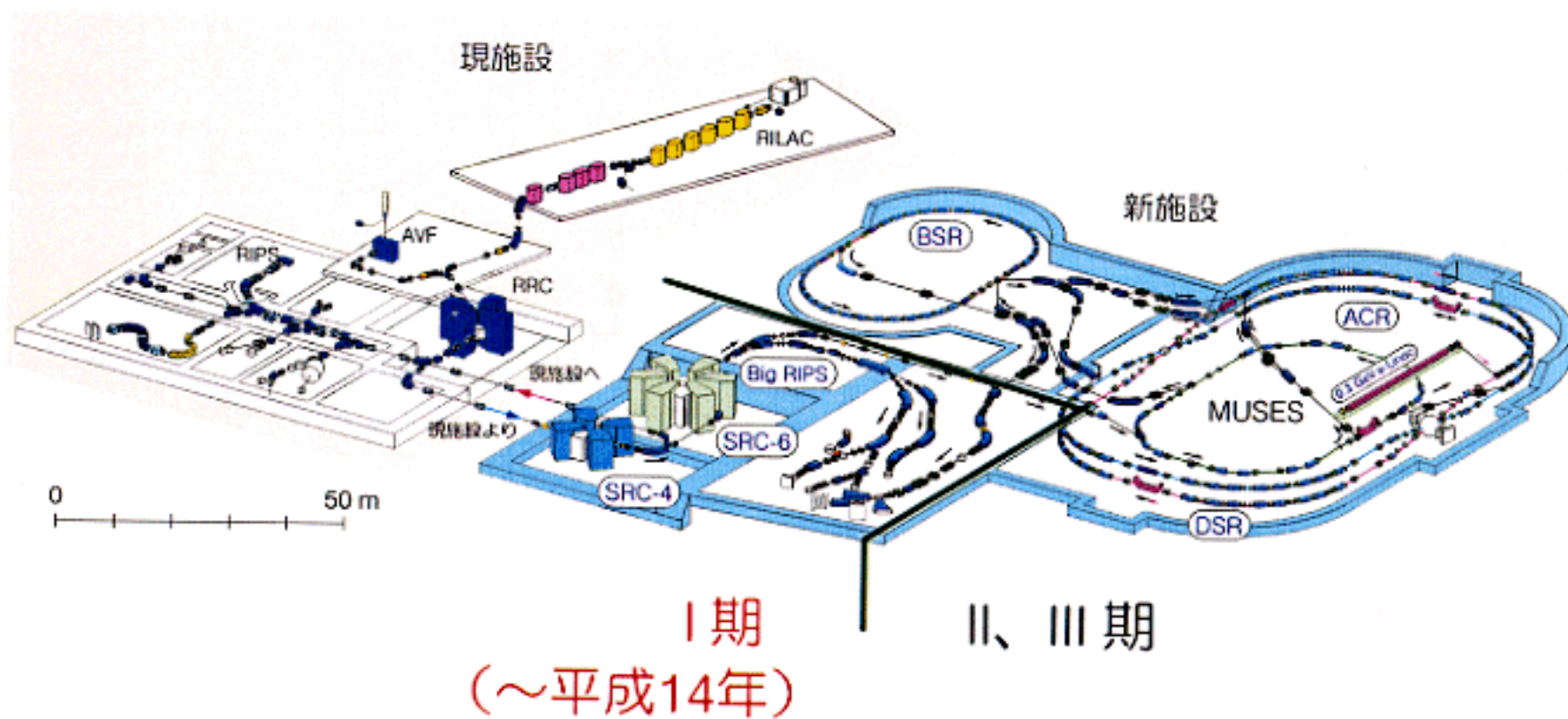
- ・世界最大強度の重イオンビームの実現

- ・RIビームの高品質化

- ・世界初の超伝導リングサイクロトロンの実現

- ・不安定核の新X線分光学の実現

建設スケジュール

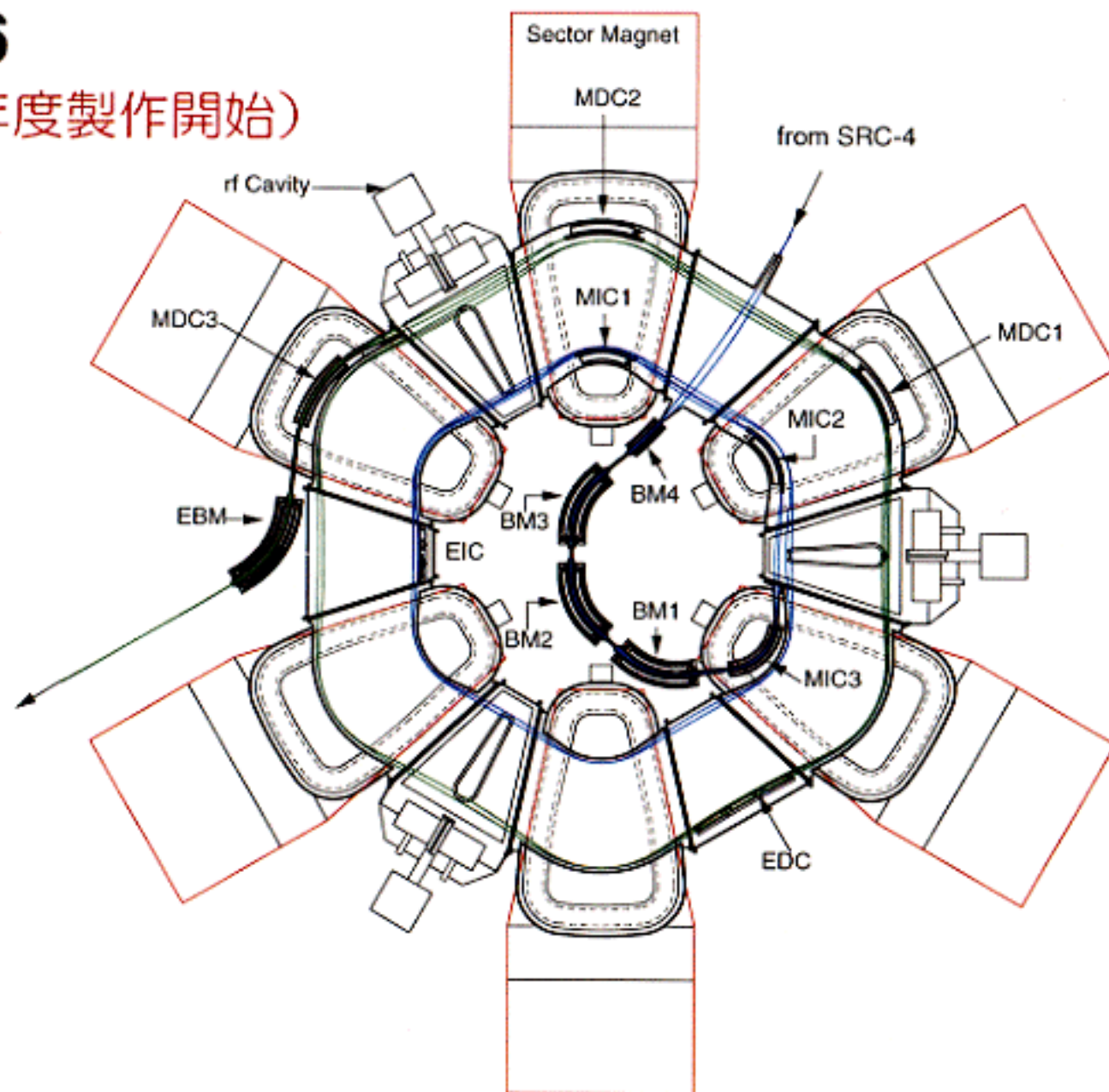


平成 1 0 年度の整備計画

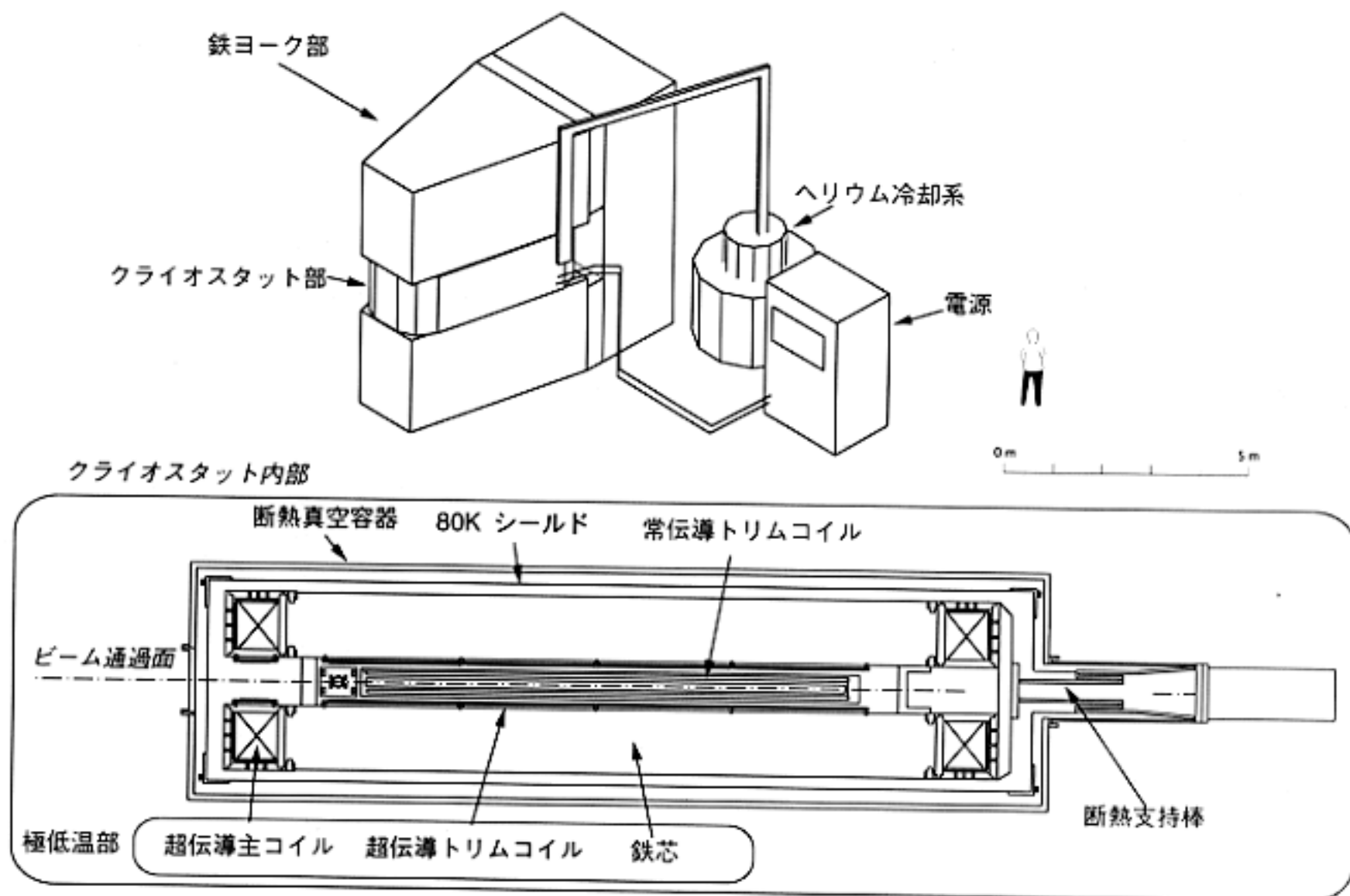
- 建屋建築のための準備工事
- SRC-6用超伝導セクター電磁石 6 台の製作開始

SRC-6

(平成10年度製作開始)

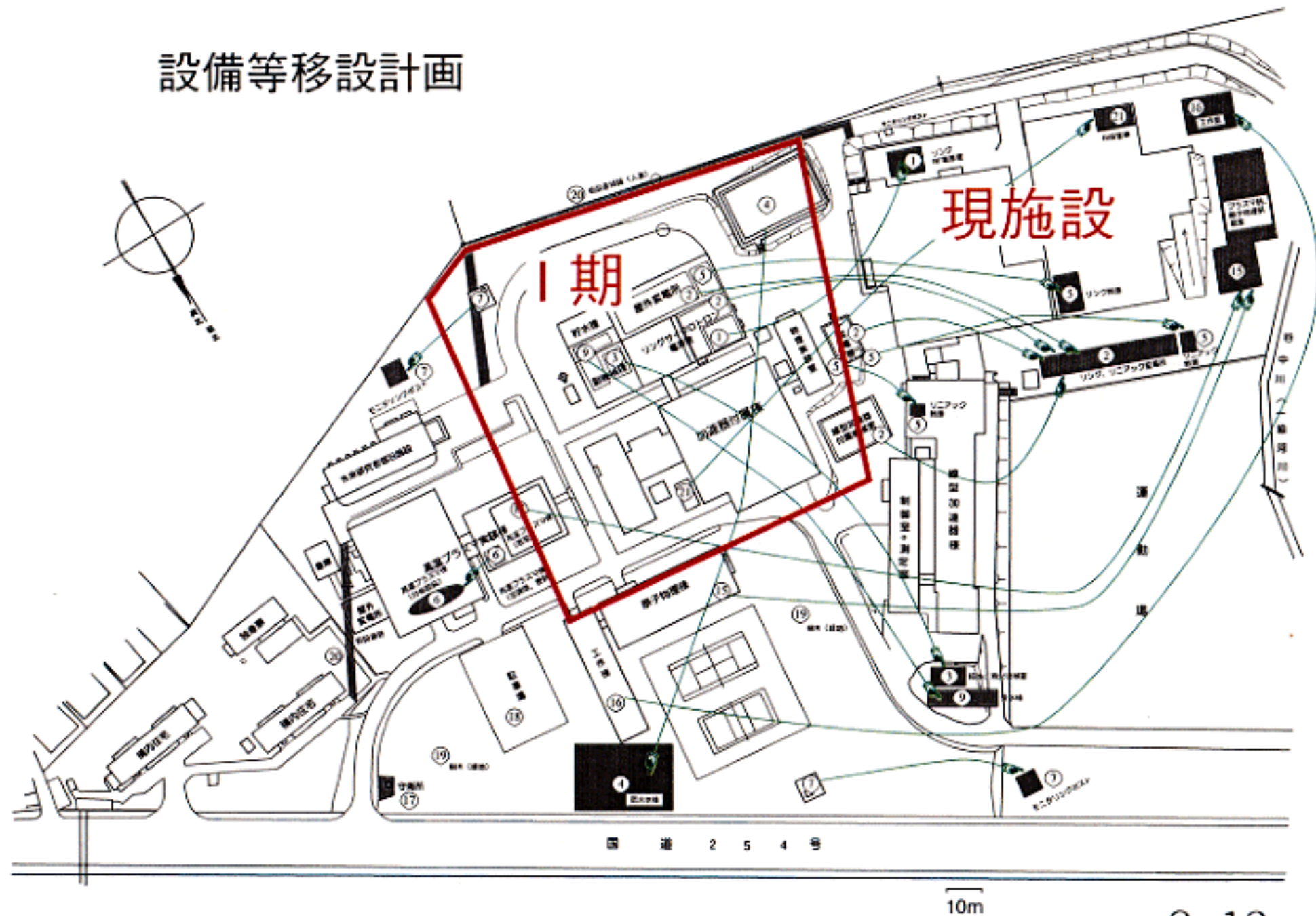


セクター電磁石 (SRC-6)の構成要素



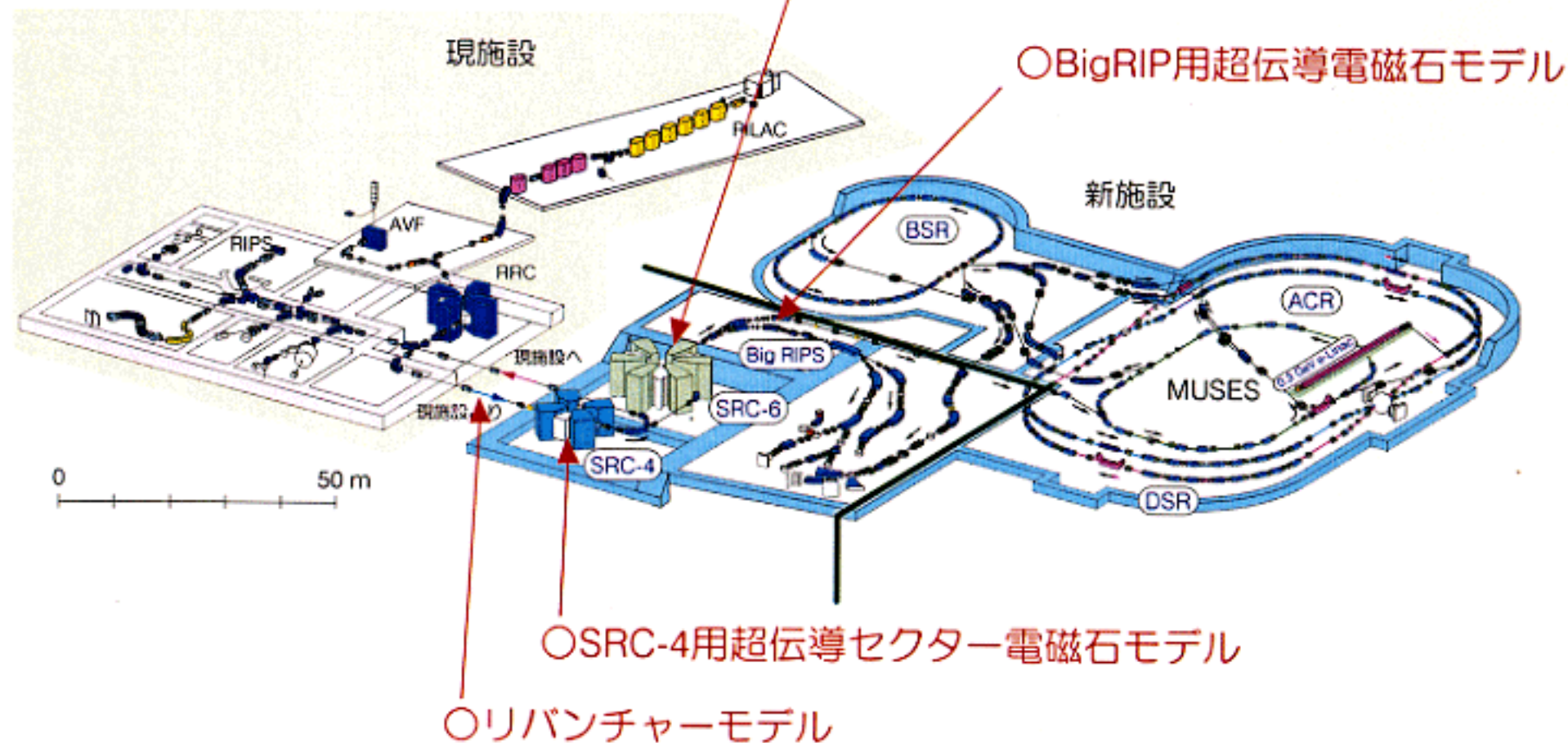


設備等移設計画



平成10年度 R & D

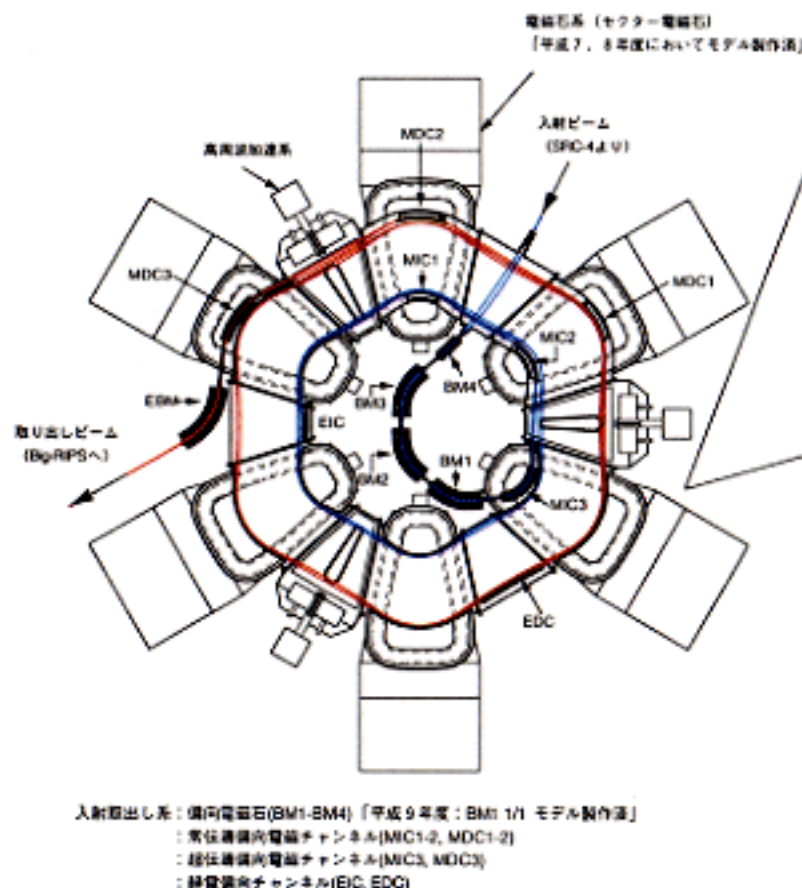
○SRC-6用超伝導電磁偏向チャンネルモデル
○SRC-6用加速装置モデル



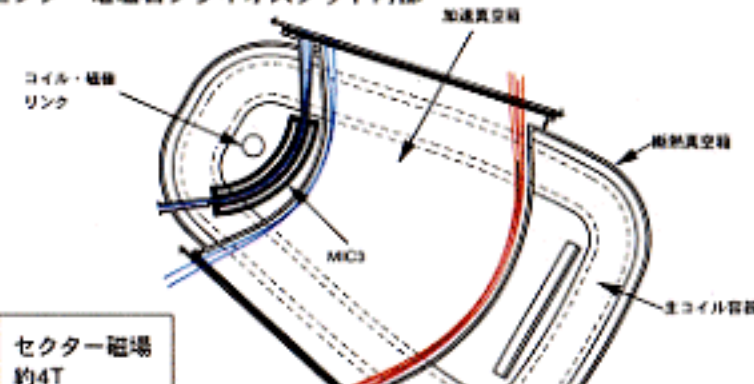
入射取り出し用偏向電磁チャンネル

SRC-6の入射偏向電磁チャンネル(MIC3)は、セクター電磁石のクライオスタット中に置かれ、セクター磁場(約4T)に約1.2Tのかさ上げ磁場を生成し、ビームを入射軌道に乗せる為に用いられる超伝導の電磁石である。超伝導電磁石においては、線材の動きによるコイル温度の上昇によって、コイル全体が超伝導状態から常伝導状態へ転移し、コイルに電流が流れなくなる現象(クエンチ現象)がみられる。そのため、定格磁場実現のためにはコイルを如何にしっかりと巻き、線材の動きを抑えるべく支持するかが製作上の要点となる。MIC3は曲率半径が約80cmであるため、既に巻き線方法や支持方法が確立されているまっすぐな超伝導電磁石の製作に比べて困難である。本研究開発では、上記の理由で製作が困難と考えられるMIC3の1/1スケールモデルを製作しコイルの巻き線方法や支持方法を確立し、定格磁場実現を目指す。

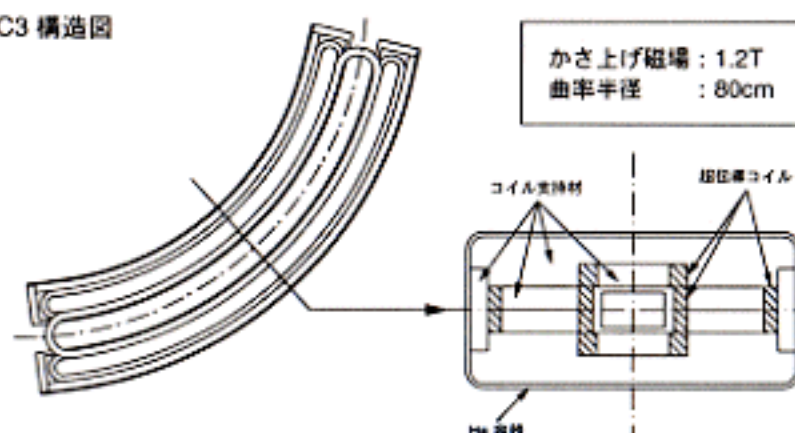
6セクター超伝導リングサイクロトロン (SRC-6)



セクター電磁石クライオスタット内部

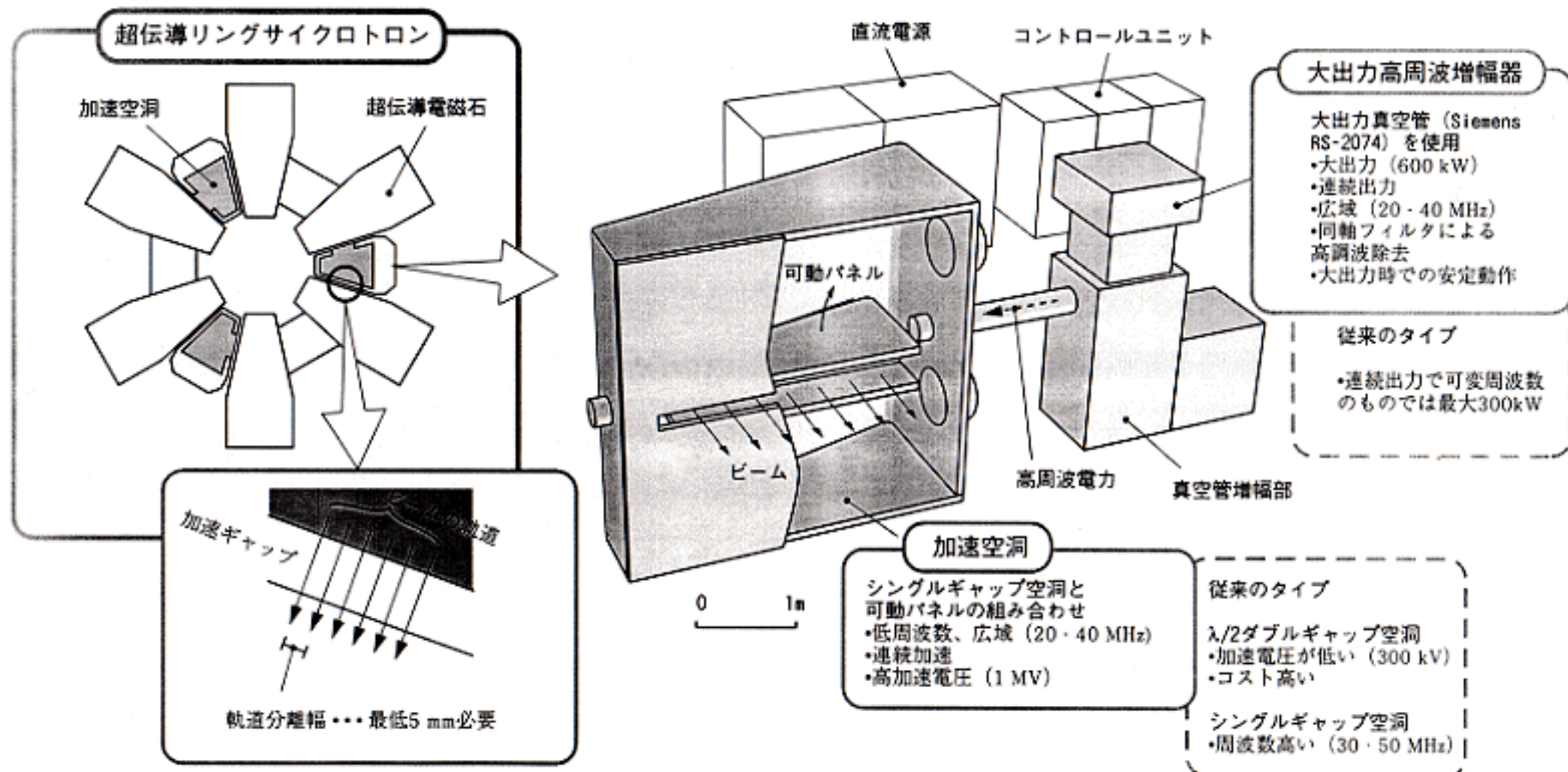


MIC3 構造図



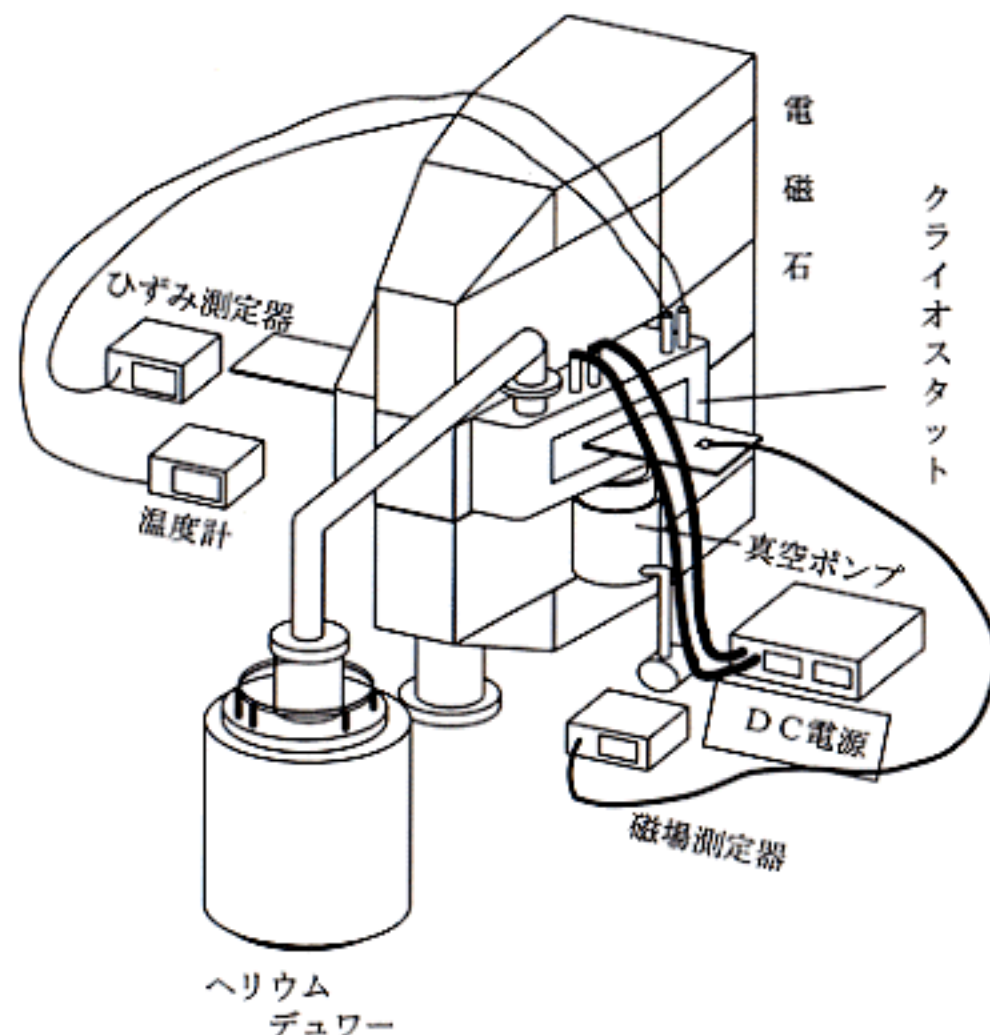
SRC-6用加速装置

超伝導リングサイクロトロン (SRC-6) では、高い磁場中をビームが周回するため、隣り合う軌道の間隔が狭くなる。十分な軌道分離幅を確保するためには、全周波数領域において空洞一台当りの加速電圧を1MV程度にする必要があるが、従来のタイプでこの性能を出せるものはない。したがって、新しいタイプの加速空洞と大出力の高周波増幅器を開発する必要がある。加速空洞は電力損失の少ないシングルギャップタイプの空洞に可動パネルを組み合わせ、さらにディー電極の形状を最適化して低周波数での周波数可変域を広くする。増幅器には大出力の真空管を使用し、終段プレート回路と電力供給ラインの最適化を行って大出力時の安定動作を実現する。



SRC-4用超伝導モデルセクター電磁石

リングサイクロトロン中のビームは、セクター内で発散し、セクター電磁石エッジ部を通過する度に集束（エッジフォーカス）される。この振動運動（集束と発散）を繰り返しながら、ビームは安定に加速されていく。この振動がある特定の周波数になった時、ビームの振動が共鳴を起こし、ビームが散逸されてしまう。これを防ぐためには、この振動の周期を決めているエッジフォーカスの強さ正確に評価して、リングサイクロトロンを設計しなければならない。エッジフォーカスの強さは、セクター電磁石のエッジ部における磁場勾配によって決まるが、この磁場勾配は、計算だけでは正確に求めることが出来ず、モデルを製作し詳細に磁場測定を行わなければならない。本研究においては、SRC-4用セクター電磁石の1/3スケールモデルを製作し、発生磁場分布の測定を行う。SRC-4用セクター電磁石のセクター角、磁極の長さ、ポール間ギャップ等は、この磁場測定の結果を反映して最終的に決定される。

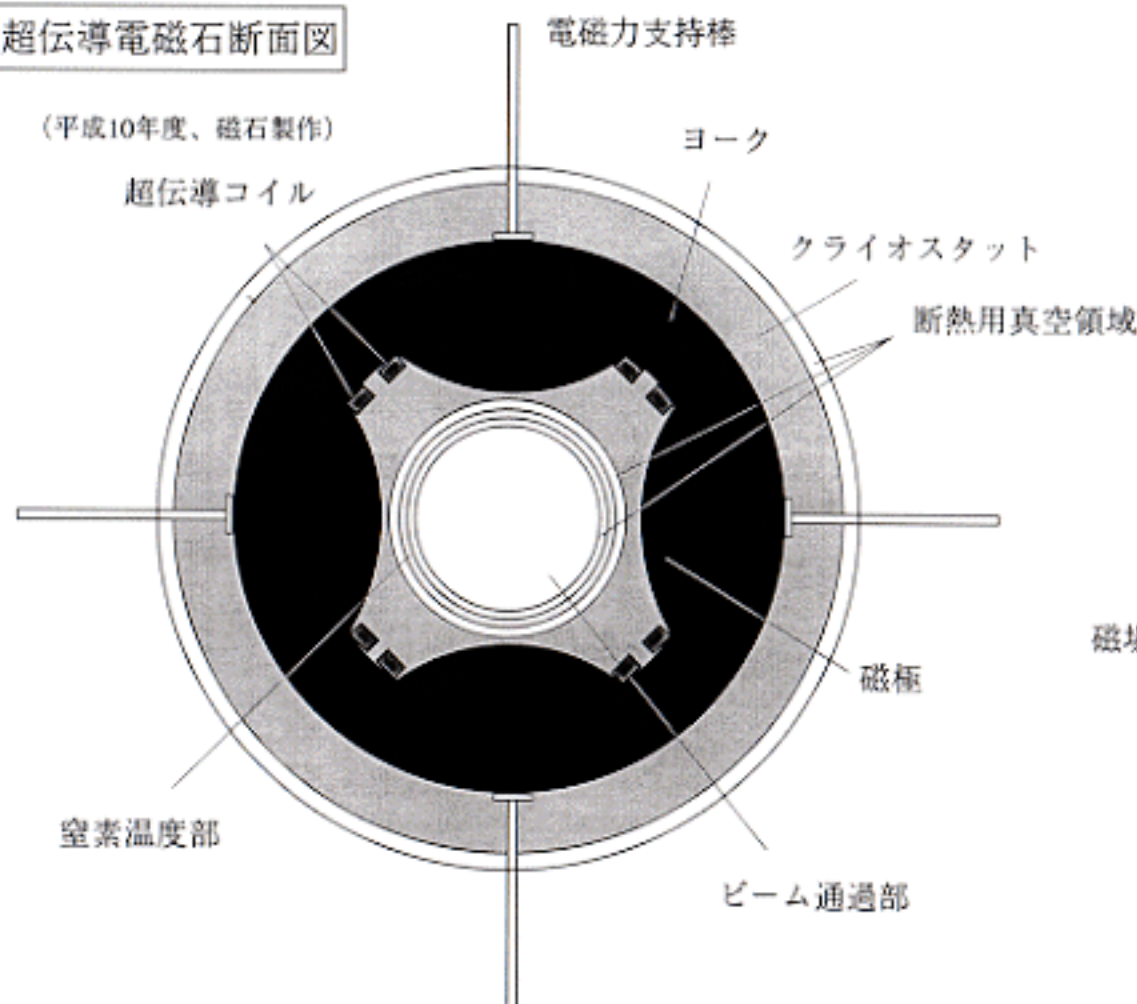


Big RIPS 用モデル電磁石

RI ビームファクトリーでは、入射核破砕反応を用いてRIビームを生成する。Big RIPSはRIビームの発生、分離、集束を行なう装置であり、その集束には十数台の四重極電磁石を用いる。これら四重極電磁石にたいする要求は、大きな磁気剛性を持つRIビームにたいする強い集束力、大強度のRIを供給するための大口径化、および、省スペースのためのビーム方向の長さの短縮化である。短い四重極電磁石が強い集束力をもつためには、磁場勾配を大きくしなければならないが、上記の様な大口径型のものでは、このために磁極における磁場を非常に大きくすることが必要になる。このような事情のもと、Big RIPS四重極電磁石には超伝導のものを採用する。

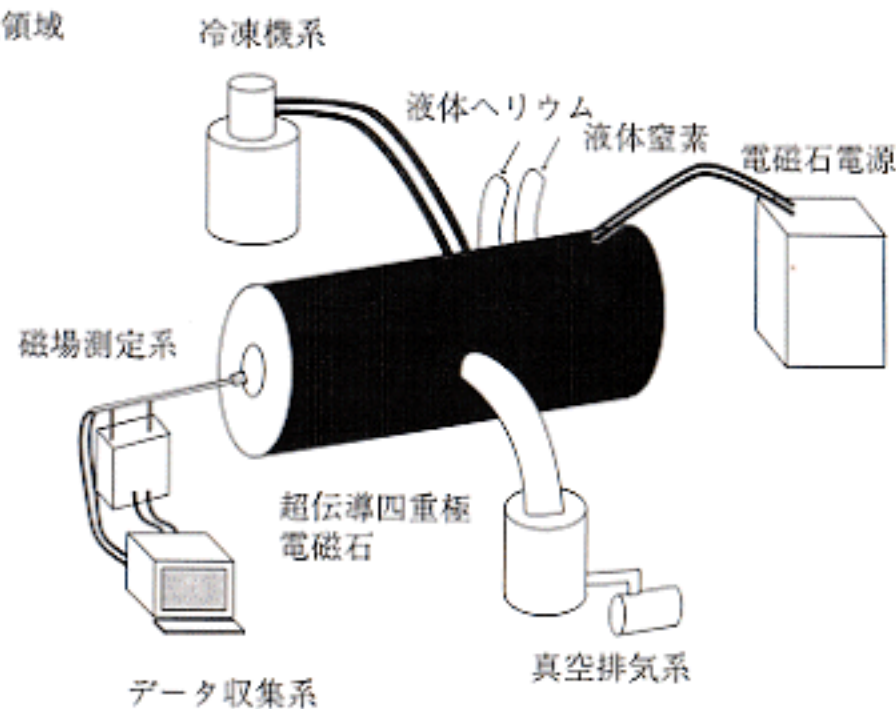
本装置はこのモデルであり、下図にその様子を示す。モデルではできるだけ大口径で強磁場の電磁石の製作を試み、これを通じて、超伝導状態の保持、電磁力の支持の仕方を研究、開発する。また、このモデルのように強磁場で大口径の電磁石の場合、磁場の磁石外への漏れが大きく、その見積もりは通常のコードだけでは精度がよくないため、本モデルを用いて磁場分布を測定する。得られた情報は、実機の製作、ビームの軌道計算に役立つ。

超伝導電磁石断面図



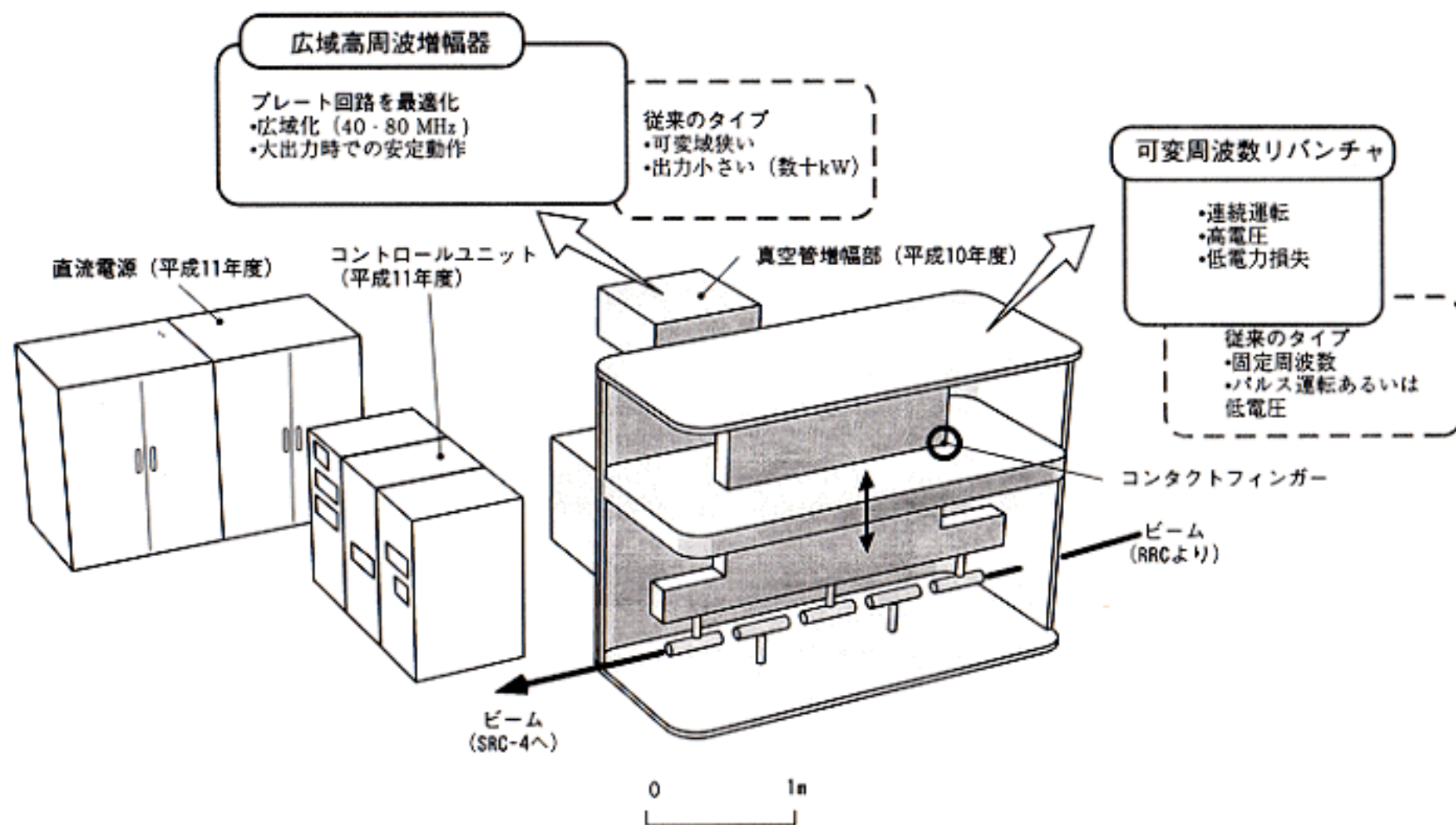
磁場測定系概念図

(平成11年度、磁場測定)



リバンチャ

リングサイクロトロンから引き出されたビームはエネルギーに広がりがあるため、これをそのまま輸送するとSRC-4入り口でのビームバンチが空間的に長くなりすぎ、SRC-4で効率よく加速できない。したがって途中のビームラインにリバンチャが必要になる。リバンチャに要求される性能は1) リングサイクロトロンRF周波数の2倍(36・76 MHz)の範囲で周波数可変であること、2) 実効加速電圧が2 MV程度であることである。この目的のため、広い範囲で周波数が可変であり、電力損失が小さい空洞共振器と、高周波増幅器を開発する必要がある。



理研RI ビームファクトリー計画に関する国際アドバイザリーグループの報告書（1994年11月）

まとめの抜粋

1. 国際アドバイザリーグループは、**理研RI ビームファクトリーの建設計画**を強く歓迎する。提案されている施設は、現存する理研加速器系を基礎としており、**想像力に富み(imaginative)**、また**経済的な設計**となっている。
2. 提案されている施設で可能になる研究から、原子核と原子核反応の性質について、重要で新しい洞察が期待できる。原子物理学、宇宙物理学も同様に非常に衝撃を受けるであろう。
3. **理研のスタッフ**は現在の施設を生産的に運転してきており、その使用を通して**重大な科学的進歩**をしているため、最も重要な資源である。この提案のためには、前任スタッフ、若手スタッフ両方の相当な増員が必要であろう。
4. できるだけはやく**マネジメントチームを組織する**ことを勧める。
5. **一次ビームの強度を増強後の施設で二桁上げる**ことが重要である。1 MWレベルでのハイパワー重イオンビームの加速と取り扱いには、**広範なR&D研究**が必要となろう。MUSES（二重蓄積リング）には高いルミノシティが必要である。
6. 世界中の加速器物理学者の経験と知識を利用すべきである。1つの機構は、国内外で、理研RI ビームファクトリーで出くわすであろう問題と類似した問題を取り扱った経験のある**国際的な加速器の専門家を含む委員会（TAC）**の評価を受けることである。
7. 理研が、**国内外から適当な研究所の参加**を招くことを勧める。理研は、実験を詳細に組織立て、必要な検出装置の設計を行うため、興味を持つ科学者を招くべきである。
8. 幸運をお祈りする。

理研RI ビームファクトリー計画に関する国際アドバイザリーグループ
構成委員

C. Detraz	フランス国立素粒子原子核研究機構 (IN2P3) 所長 (前国立重イオン大型加速器研究所 (GANIL) 所長)
H. Ejiri	大阪大学核物理研究センター (RCNP) センター長
H. Feshbach (議長)	米国マサチューセッツ工科大学 (MIT) 教授 (原子核理論物理学者)
G. Herrmann	ドイツ マインツ大学ヨハネスグーテンブルグ核化学研究所教授 (核化学実験物理学者)
P. Kienle	ドイツ ミュンヘン工科大学教授 (前国立重イオン加速器研究所 (GSI) 所長)
I. Martinson	スウェーデン ルント大学教授 (実験原子物理学者)
G.C. Morrison	イギリス バーミンガム大学物理・宇宙研究所所長
K. Nakai	高エネルギー物理学研究所 (KEK) 教授 (文部顧問)
Y.T. Oganessian	ロシア国立原子核研究所 (DUBNA) 所長
J. Schiffer	米国アルゴンヌ国立研究所 (ANL) 教授 (原子核実験物理学者)
R.H. Siemssen	オランダ グロニンゲン大学超伝導サイクロトロン研究所所長
B. Sinha	インド国立サイクロトロン研究所 (VECC) 所長
B.W. Wei	中国国立近代物理研究所所長

重イオンビームの大強度化

18GHz世界最大強度ECR重イオン源の完成

- ・プラズマカソード法の発明
- ・アルミナコーティング法の発明
- ・有機金属化合物供給法の発明
- ・電気泳動によるCa48濃縮法の開発開始
- ・アフターグロー法の開発

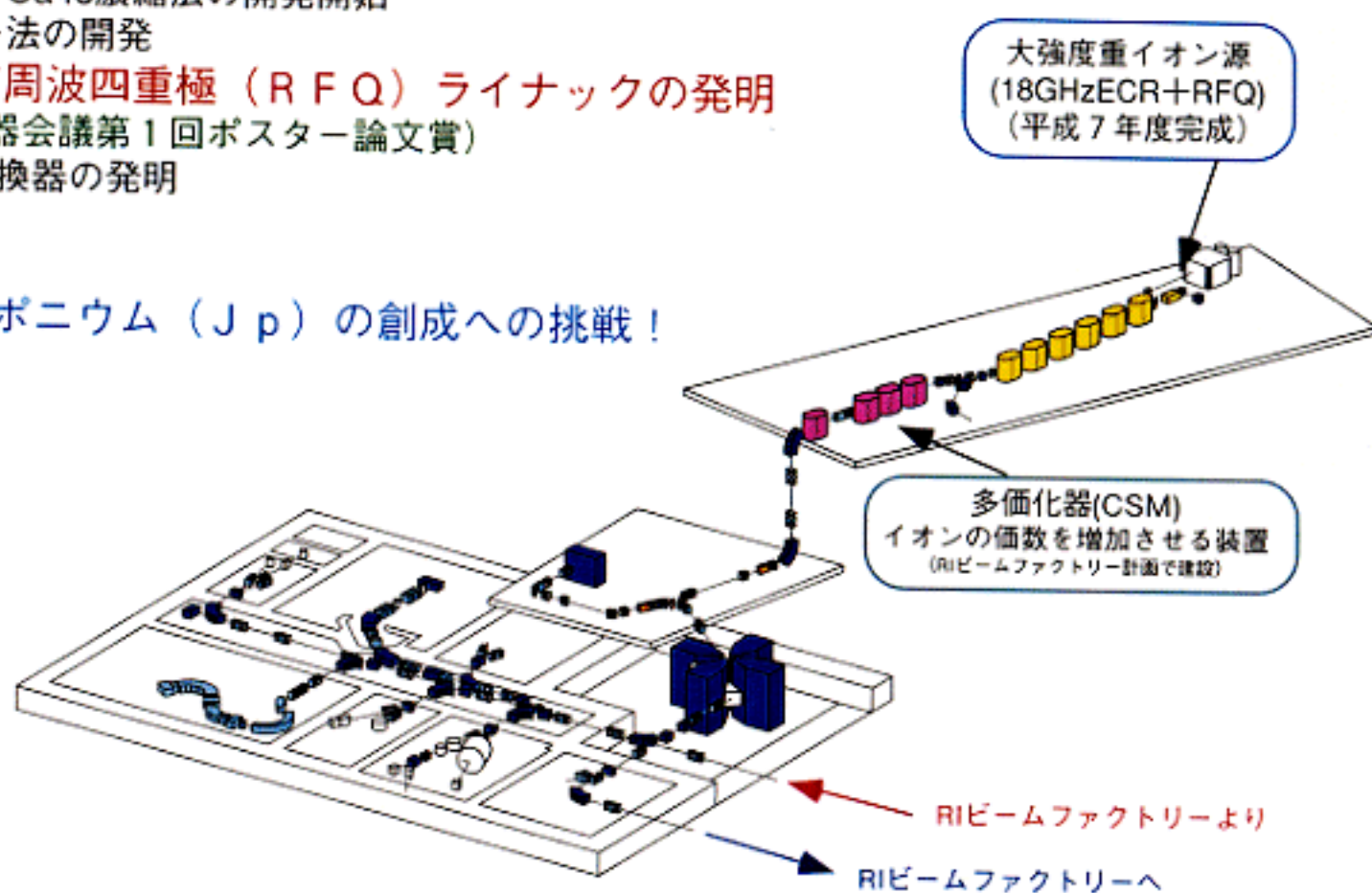
周波数可変型高周波四重極 (RFQ) ライナックの発明

(欧州国際加速器会議第1回ポスター論文賞)

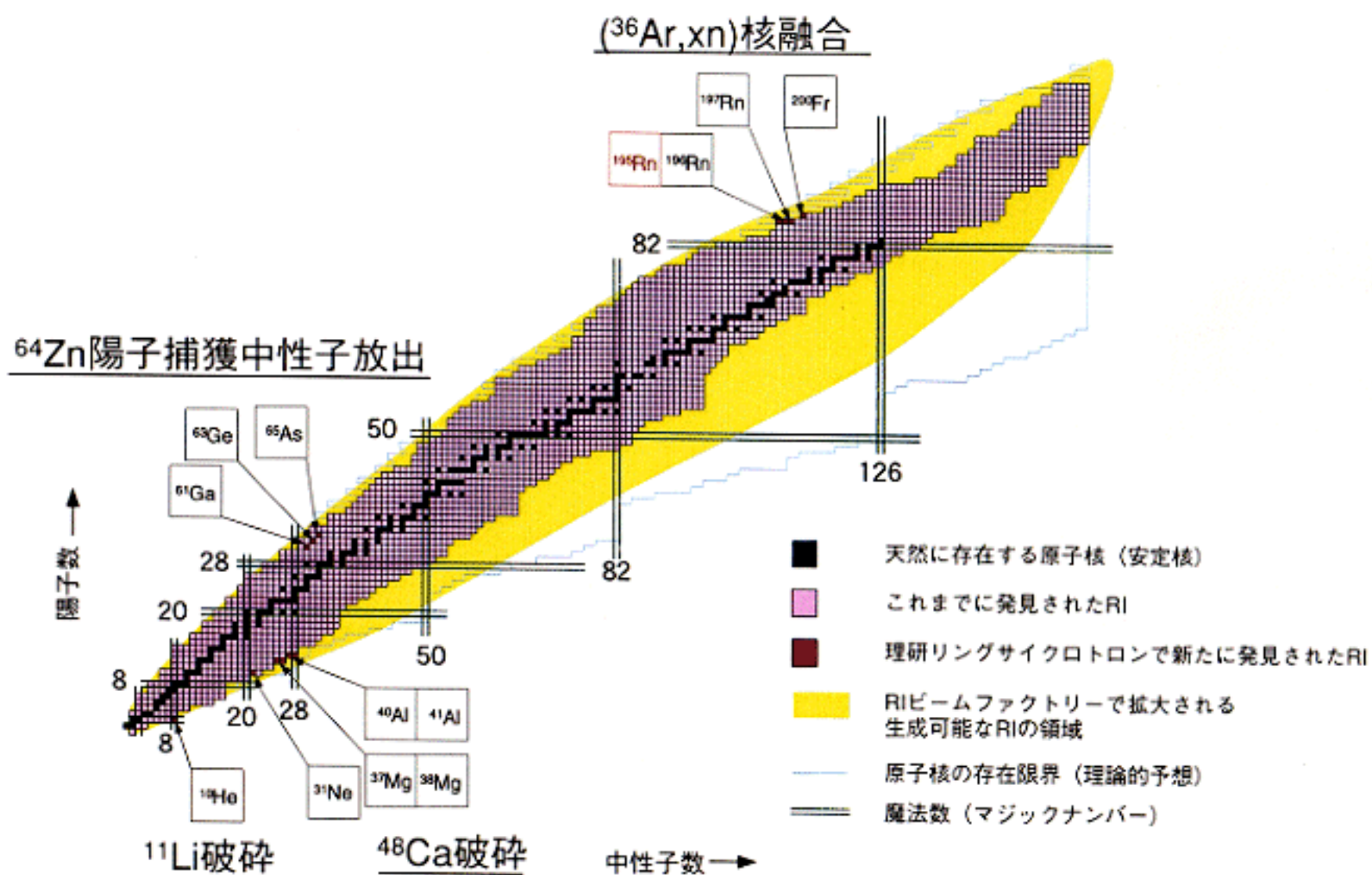
アクティブ荷電変換器の発明



新超重元素ジャポニウム (Jp) の創成への挑戦!



新同位元素の発見



R I ビームファクトリー
国際加速器技術評価委員会

○ 時期 平成9年11月

○ 評価委員

I. Meshkov

ロシアドブナ研究所

W. Joho

スイスポールシェラー研究所

H. Blosser

米国国立超電導サイクロトロン研究所

K. Ziegler

ドイツハーンマイトナー研究所

R. Oganessian

ロシアドブナ研究所

R. Pollock

米国インディアナ大学サイクロトロン施設

B. Franzke

ドイツ国立重イオン加速器研究所

M. Craddock

カナダトライアンフ研究所

D. Moehl

CERN

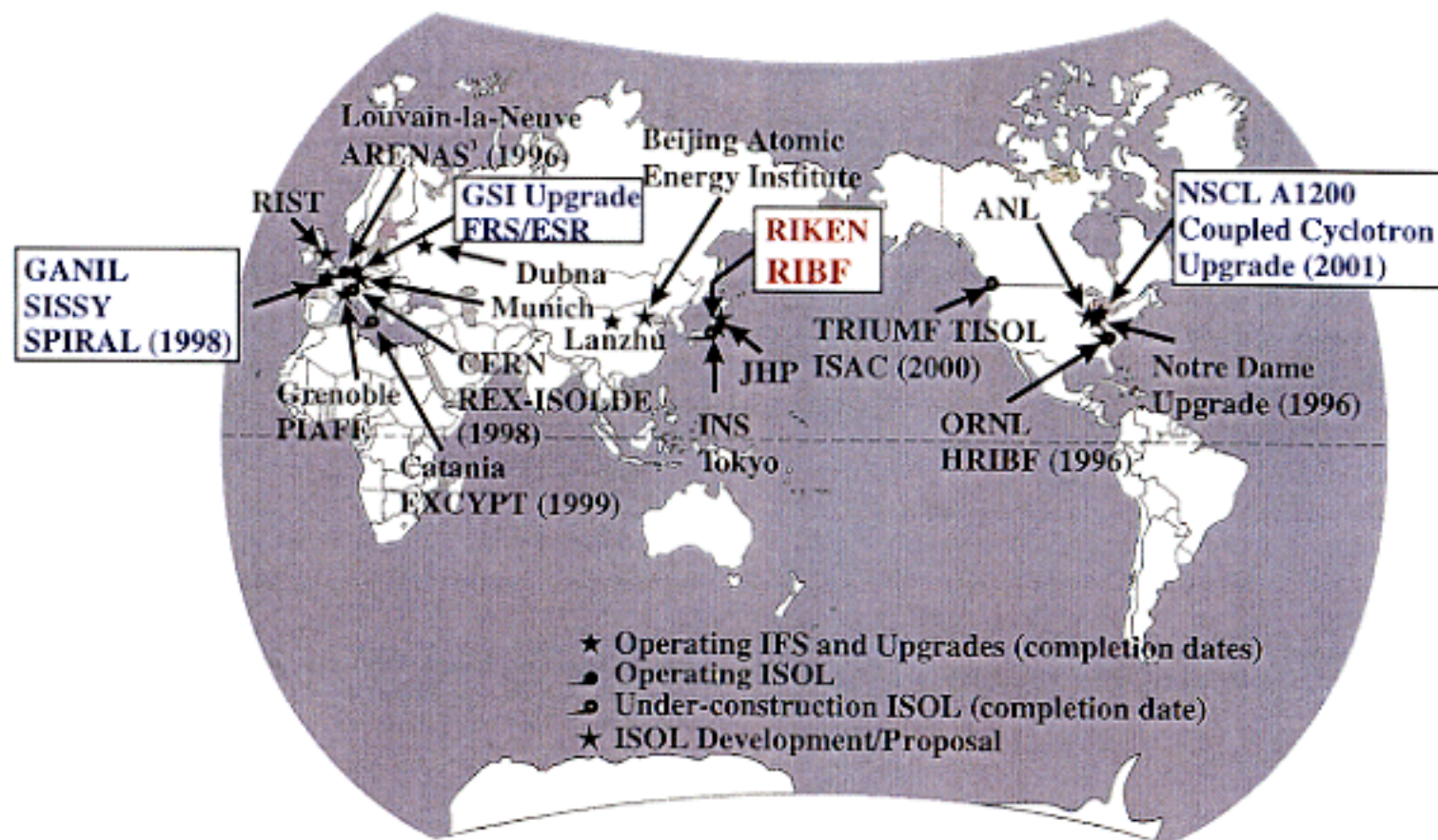
A. Chabert

フランス国立重イオン加速器研究所

N. Dikansky

ロシアノボシビルスク研究所

World Wide Radioactive Beam Facilities



Nuclear Structure with Exotic Beams

D. Habs

Status of RIB-facilities + GSI-upgrade

Intense high energy beams
with ions of low charge state

$$\text{Int(GSI-upgrade)} \sim (10-10^4) * \text{Int(Riken, MSU-upgrade)}$$

Physics with Exotic Beams

- i) Super heavy elements
- ii) Physics at the drip line
- iii) Shell structure far from stability

Production Rates

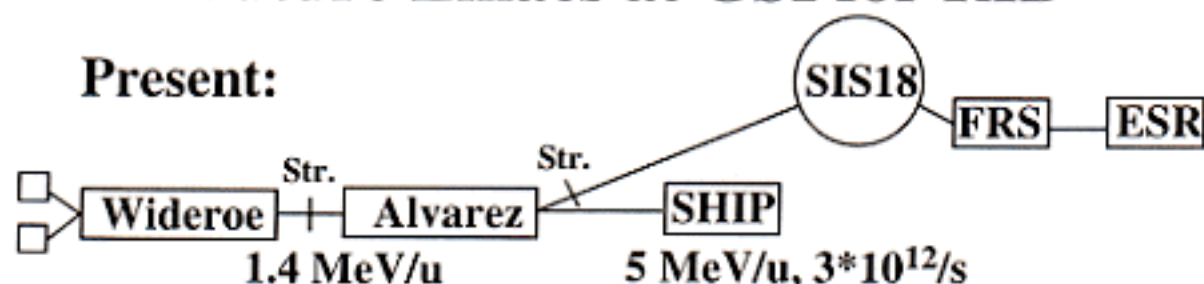
Nuclear Structure with Energetic Radioactive Beams

- i) Single pass
- ii) Storage ring physics
- iii) e⁻-collider, p-collider

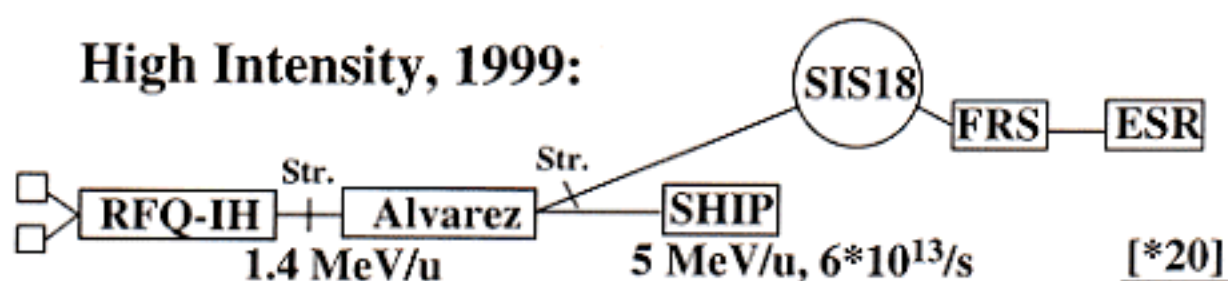
Conclusion

Future Linacs at GSI for RIB

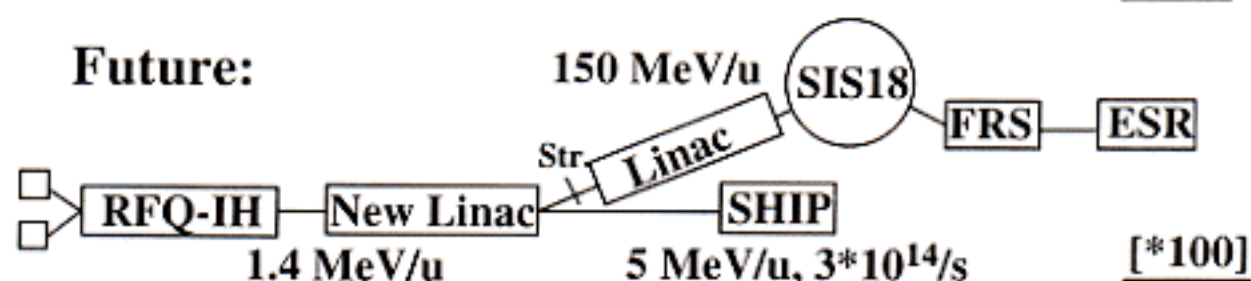
Present:



High Intensity, 1999:



Future:



Primary Beam Intensities

Element	GSI Upgrade 150 MeV/u LINAC		Riken RRC * SRC		MSU Upgrade K500 * K1200	
	Intensity (pps)	E/A (MeV)	Intensity (pps)	E/A (MeV)	Intensity (pps)	E/A (MeV)
O	$4 \cdot 10^{15}$	150	$1 \cdot 10^{15}$	500	$6 \cdot 10^{12}$	200
Ar	$6 \cdot 10^{14}$	150	$1.3 \cdot 10^{14}$	370	$3 \cdot 10^{12}$	180
Kr	$2 \cdot 10^{14}$	150	$1.3 \cdot 10^{13}$	270	$2 \cdot 10^{11}$	160
Xe	$1.2 \cdot 10^{14}$	150	$6 \cdot 10^{12}$	210	$1.1 \cdot 10^{11}$	145
U	$4 \cdot 10^{13}$	150	$1.3 \cdot 10^{12}$	150	$1.2 \cdot 10^9$	90
Kr	$5 \cdot 10^{11}$	1000	← SIS			
U	$2 \cdot 10^{11}$	1200				

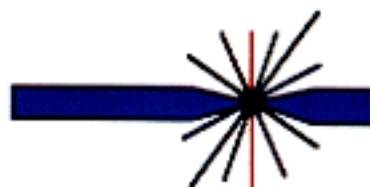
$$\text{Int}(\text{GSI}, 150 \text{ MeV/u Linac}) \sim (10-10^4) * \text{Int}(\text{Riken}, \text{MSU Upgrade})$$

(A > 50)

受賞

- 九大一理研 日本原子核談話会第2回新人賞 (1996)
「高スピンアイソマービームの開発」
- 立教大一理研 日本物理学会第2回論文賞 (1996)
「クーロン分解法による ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ 反応の研究」
- 理研加速器 欧州国際加速器会議第1回ポスター論文賞 (1996)
「周波数可変型高周波四重極線型加速器の発明」
- 理研核化学 第56回注目発明賞 (1997)
「マルチトレーサの製造方法」
- 谷畑勇夫 ブカレスト大学名誉教授 (1997)
「不安定核ビーム法の開発による原子核の新構造の発見と日本-ブカレスト大学共同研究への貢献」

ビームサイエンスにおける理研の国際研究協力



英国ラザフォードアップルトン研究所
ISIS

世界最高強度のパルス状陽子加速器に、
理研が開発した大強度超伝導ミュオン発生装置を設置

平成2年度～7年度：装置整備
平成8年度～：実験開始



米国ブルックヘブン国立研究所
RHIC

世界最高エネルギーを持つ衝突型重イオン加速器に、
素粒子対検出装置とスピン偏極制御装置を設置

平成7年度～11年度：装置整備
平成9年度～：理研BNL研究センター設置
理論研究開始
平成10年度～：実験準備研究開始
平成11年度～：実験開始

海外機関との研究協力一覧

国名	協定年月日	研究協力機関
フランス	1985/3/10	国立核物理素粒子物理研究機関 (CNRS)
中国	1988/9/20	中国科学院近代物理研究所 (IMP)
韓国	1988/10	ソウル大学 (日韓科学技術協力プロジェクトによる)
イギリス	1989/9/28	科学工学研究評議会 (SERC)
ロシア	1991/9/22	テルチャトフ研究所 (書籍のみ)
スウェーデン	1991/9/24	ユバスキラ大学 (JY)
イタリア	1991/10/1	イタリア国立核物理研究所 (INFN)
アメリカ	1991/10/8	カンザス州立大学 (KSU)
ドイツ	1992/4/23	フランクフルト大学
スウェーデン	1992/7/3	メルン大学
アメリカ	1992/9/23	ブルックヘブン国立研究所 (BNL)
ロシア	1996/1/16	原子核合同研究所 (JINR) (加速器研究施設と共同研究所及びFlavor研究機関の共同事業)
インド	1996/4/15	先進技術センター (CAT)
イギリス	1996/9/17	研究評議会中央研究所 (CCRC)



理研加速器研究施設
リングサイクロトロン
世界最多種類の粒子を
世界最高エネルギーで
加速することを実現

理研加速器施設での実験参加者統計

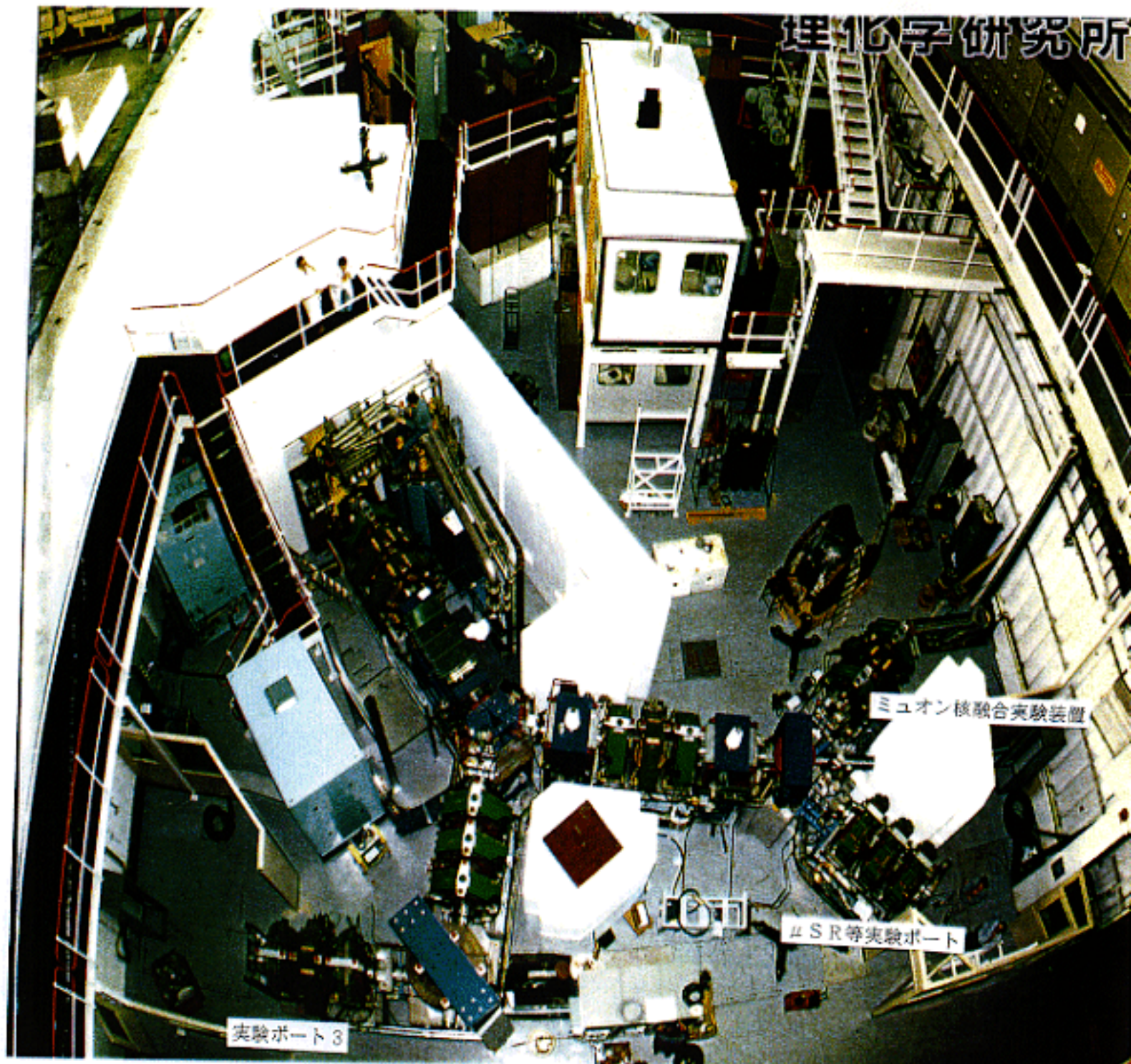
(単位：人)

年度	理研内部	理研外 (国内)	理研外 (国外)	計
1991	530	498	73	1101
1992	462	425	32	919
1993	463	765	37	1265
1994	387	548	51	986
1995	328	562	52	942

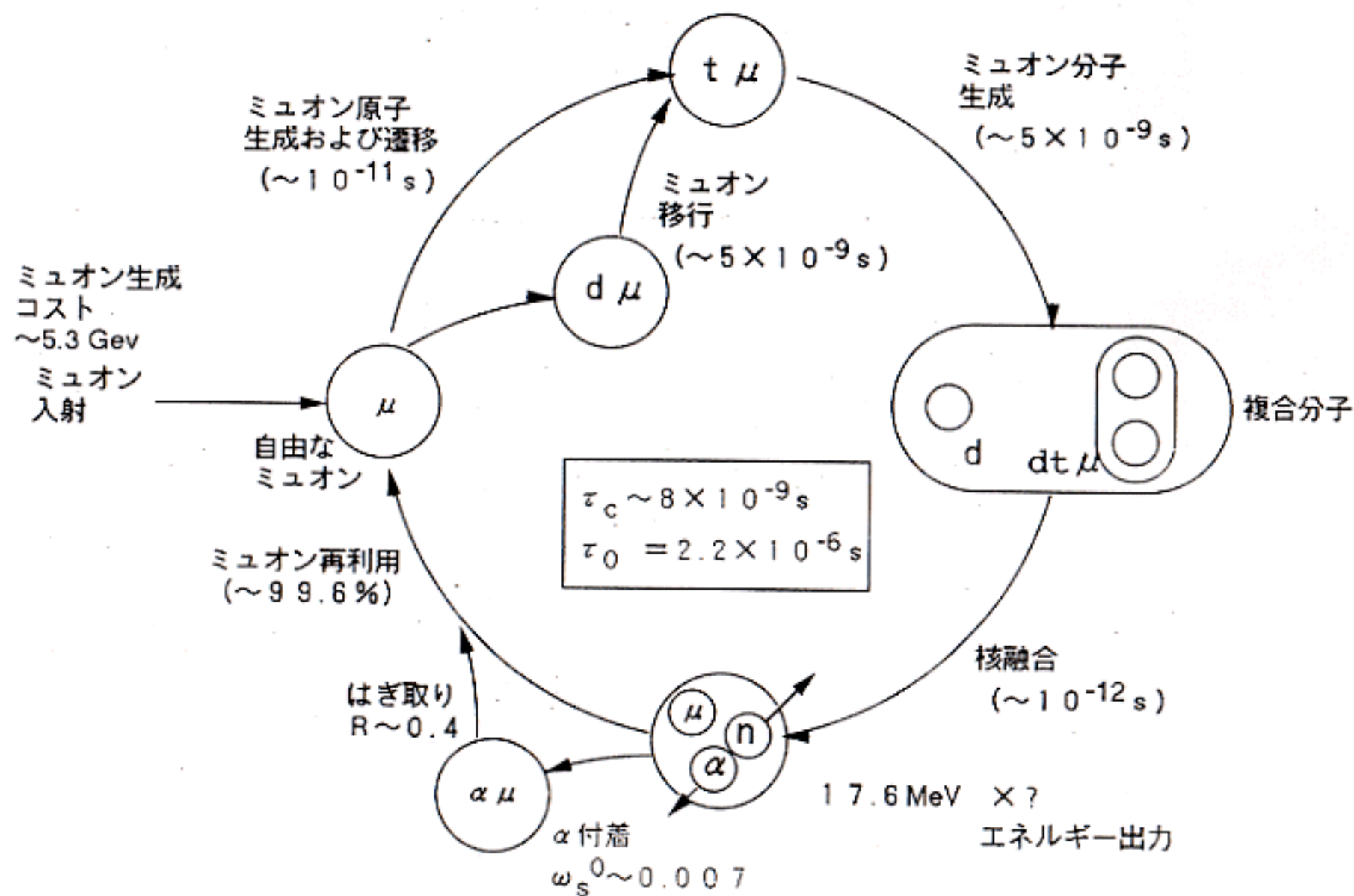
ミュオン科学研究

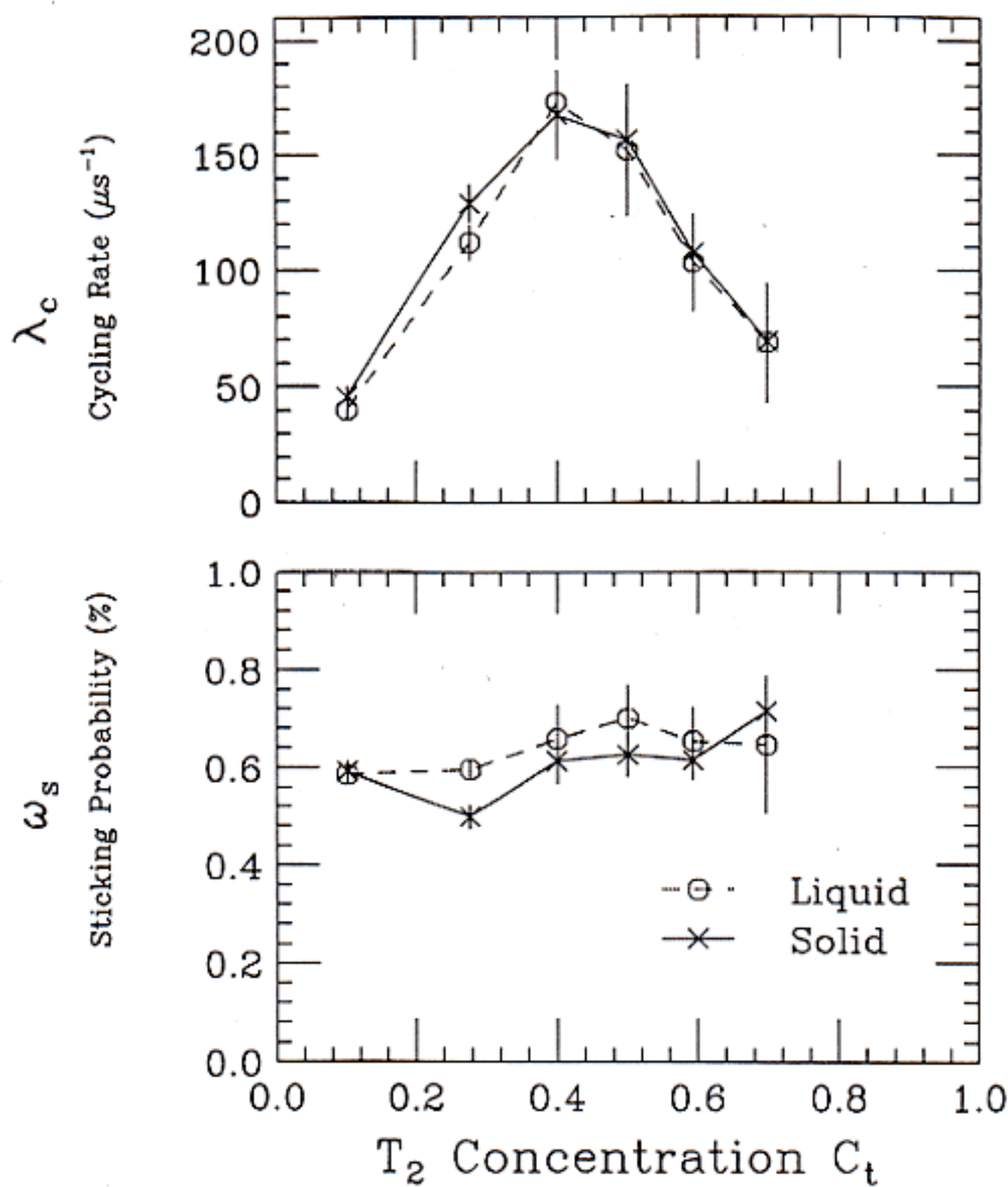
英国ラザフォード研究所(RAL)
との国際協力研究

RAL施設 →



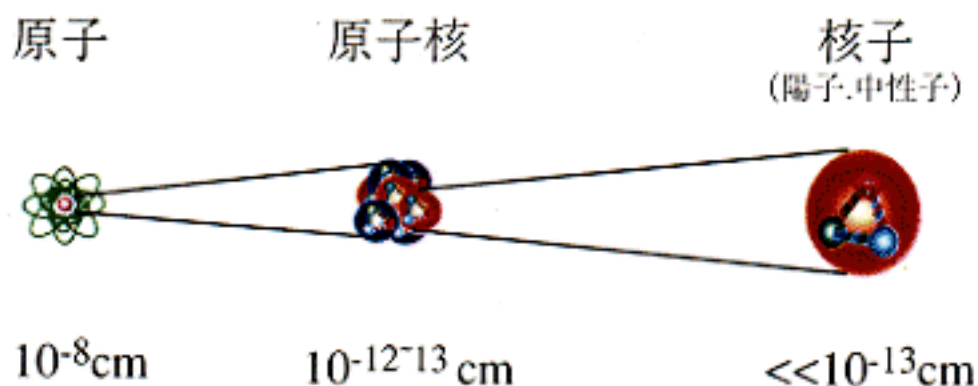
d-t ミュオン触媒核融合サイクル ($\phi \sim 1$ 、 $Ct \sim 0.3$)



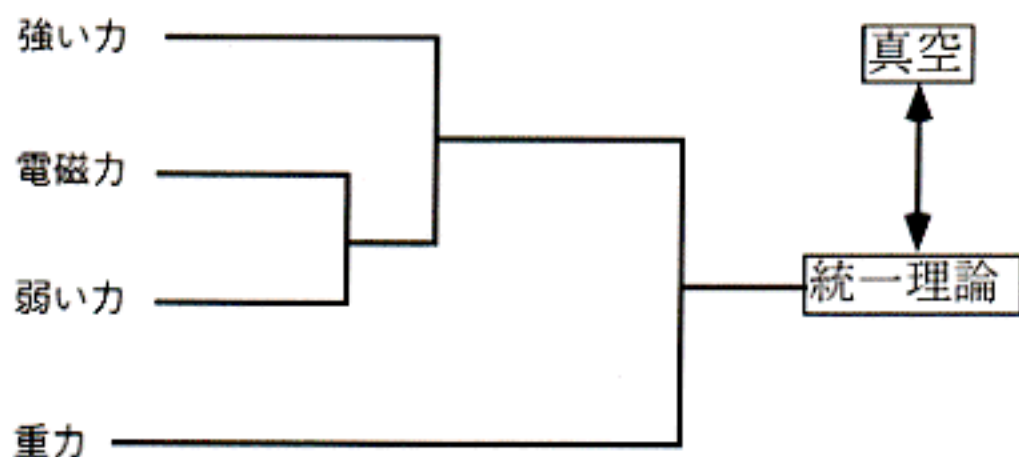


「スピン物理」研究と基礎物理

物質の階層構造



基本的相互作用 (力)



「スピン物理」

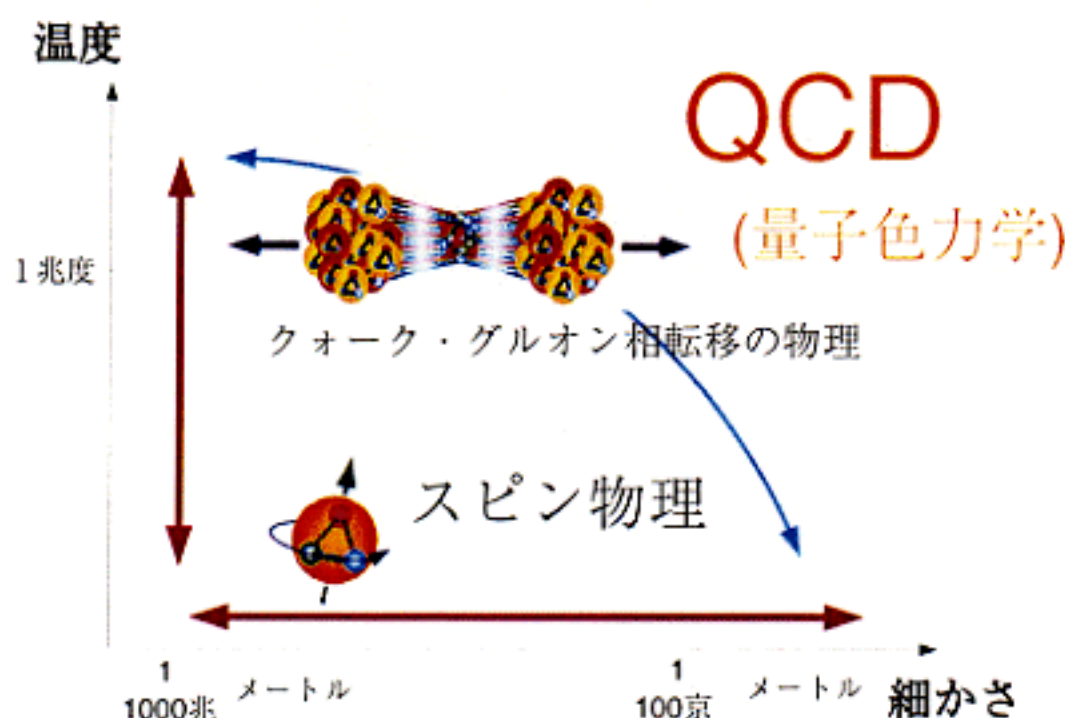
強い力(OCD)の解明

・核子のクォーク・グルーオン構造・

RHIC (数100 GeV 陽子) $\Rightarrow \lambda \sim 10^{-16} \text{cm}$

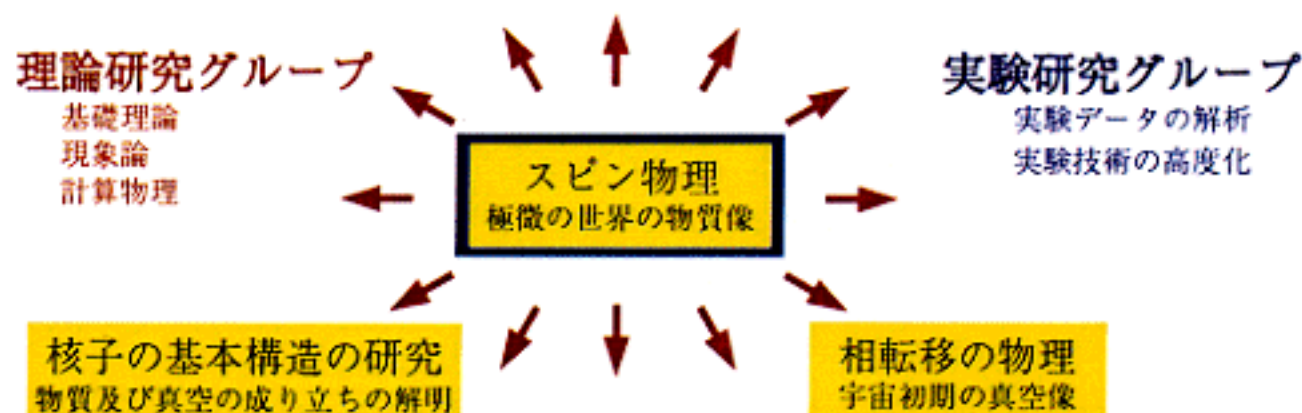
スピンで標識されたクォーク・グルーオンの振る舞い

理研-BNL協力研究「スピン物理」のテーマ



理研・BNL共同研究として推進している「スピン物理」は、物質の成り立ちを極微な世界から「スピン」を指標に解明するものである。一方、RHIC加速器を用いたもう一つの物理である「クォーク・グルオン相転移の物理」は真空を極限まで熱し、宇宙の初期の形態を探ることを目的とする。

理研BNL研究センターでは、「スピン物理」を中心にこうした「量子色力学」の先端的な研究を融合・発展させ、自然界に存在している物質及びすべての物質の背景を司る真空の成り立ちの解明に挑む。



究極の宇宙像・物質像の確立へ

米国ブルックヘブン国立研究所で建設中の 超高エネルギー衝突型加速器(RHIC)



構成： 超伝導電磁石を使用した2重の衝突リング (円周長 3.8 km)

入射： バンデグラフ → ブースター → AGS → RHIC

性能：	金+金 衝突	陽子+陽子衝突
ビームのエネルギー	100 GeV/A	250 GeV
ルミノシティ	$2 \times 10^{26} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$1.4 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

完成予定 1999年中

ブルックヘブン国立研究所との国際協力

本研究システムは、日米科学技術協力協定や本年5月に科学技術庁／米エネルギー省間で締結された包括的实施取り決めの下、国際研究協力の新しい試みとして、関係研究機関等を糾合しつつ、強力に推進する。

日米両国の研究ポテンシャルを結集し、時限的・流動的環境の中で物理学の新しいフロンティアを目指すという、新しい研究システムを設置する。

日米科学技術協力協定

政府間 1988年6月20日締結

基礎科学技術分野の共同プロジェクト協力に関する実施取り決め

科学技術庁／エネルギー省 1996年5月3日締結

超高エネルギー衝突型加速器(RHIC)を利用したスピン物理研究に関する
理化学研究所－ブルックヘブン国立研究所間協定(MOU)

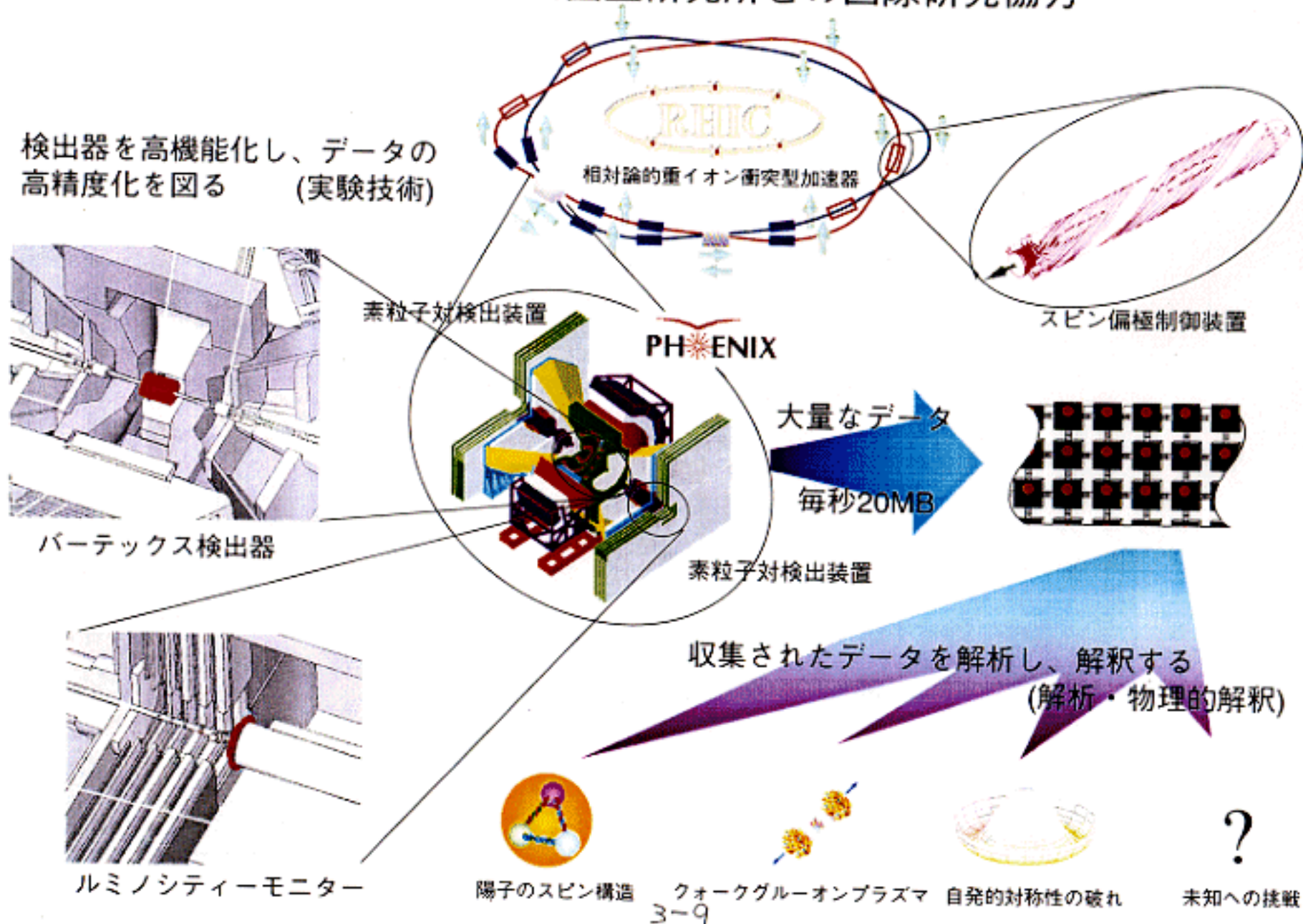
スピン物理研究

理研BNL研究センター

年次計画表

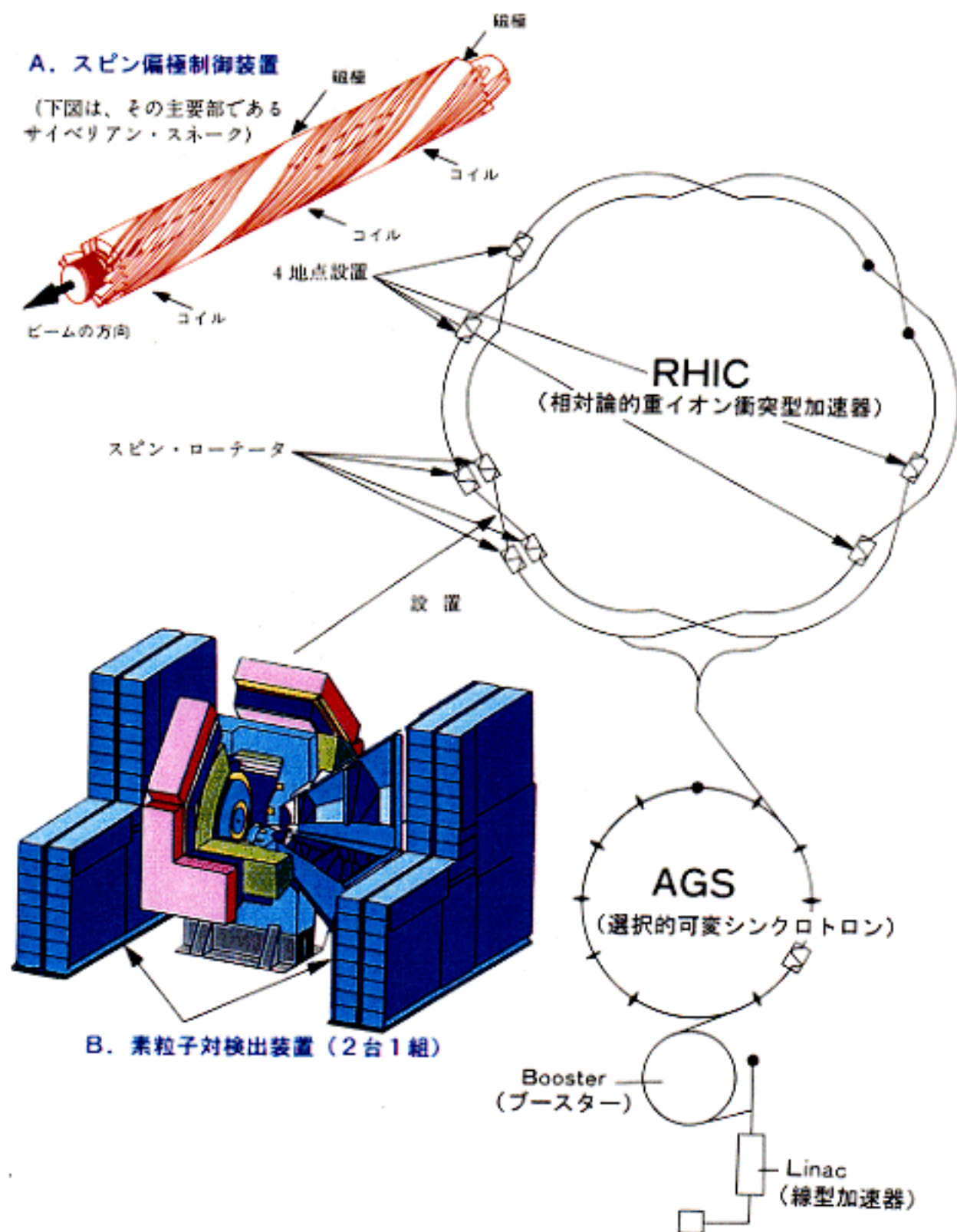
	7年度 1995	8年度 1996	9年度 1997	10年度 1998	11年度 1999	12年度 2000	13年度 2001
素粒子対検出器I							
素粒子対検出器II							
スピン偏極制御装置							
理論物理グループ							
実験物理グループ							
RHIC 実験							

米国ブルックヘブン国立研究所との国際研究協力



A. スピン偏極制御装置

(下図は、その主要部である
サイベリアン・スネーク)

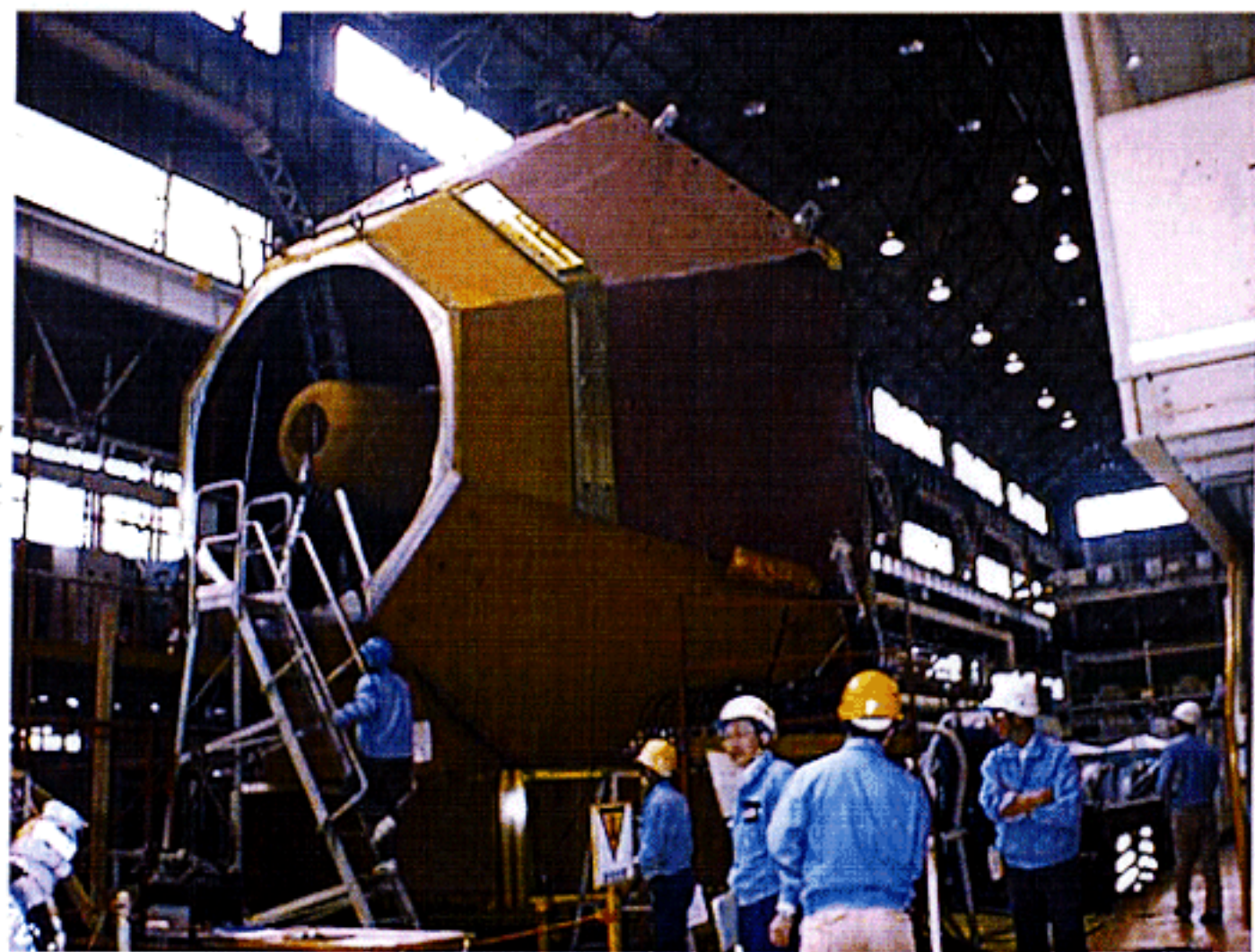


B. 素粒子対検出装置 (2台1組)

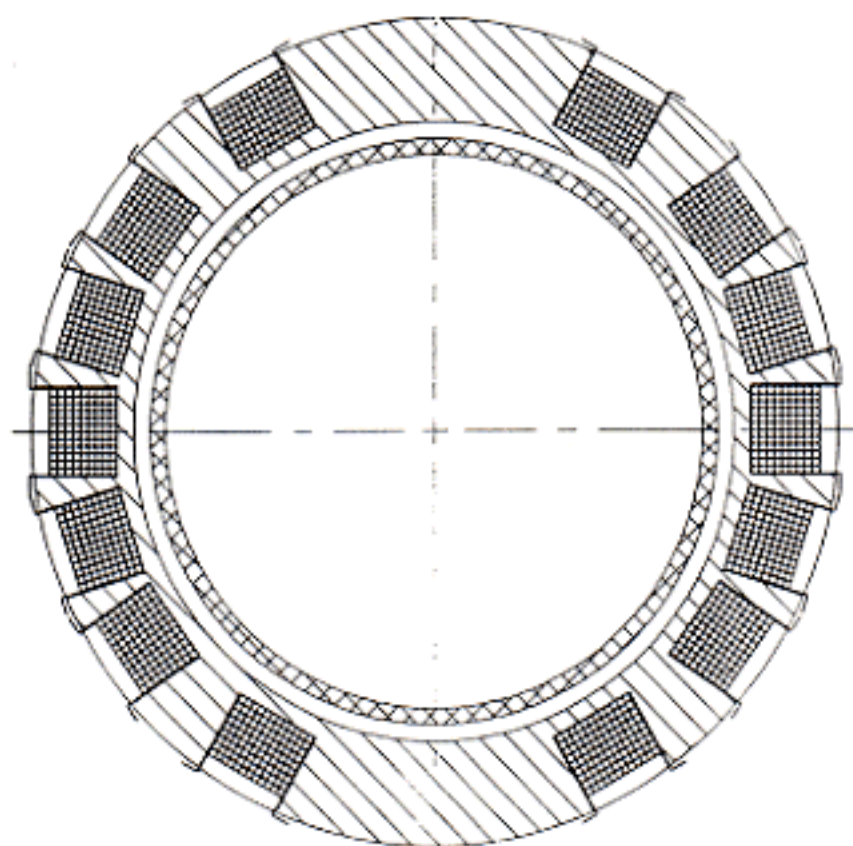
完成したミュオン電磁石（素粒子対検出装置 基幹部）の性能試験の様様

三菱電機 神戸製作所にて1997年2月26日に撮影

(本装置は1997年4月にブルックヘブン国立研究所に搬入されました)

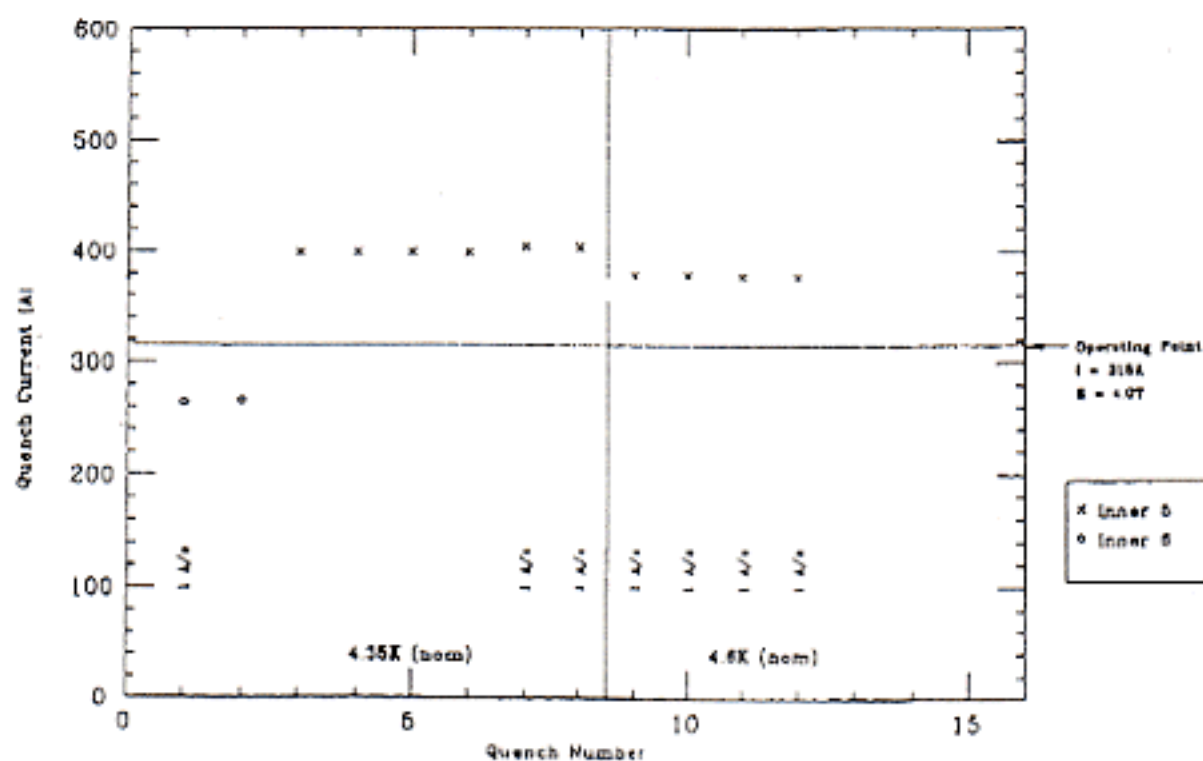


溝切型超伝導ソレノイド磁石の断面
(サイベリアンスネークのプロトタイプ)

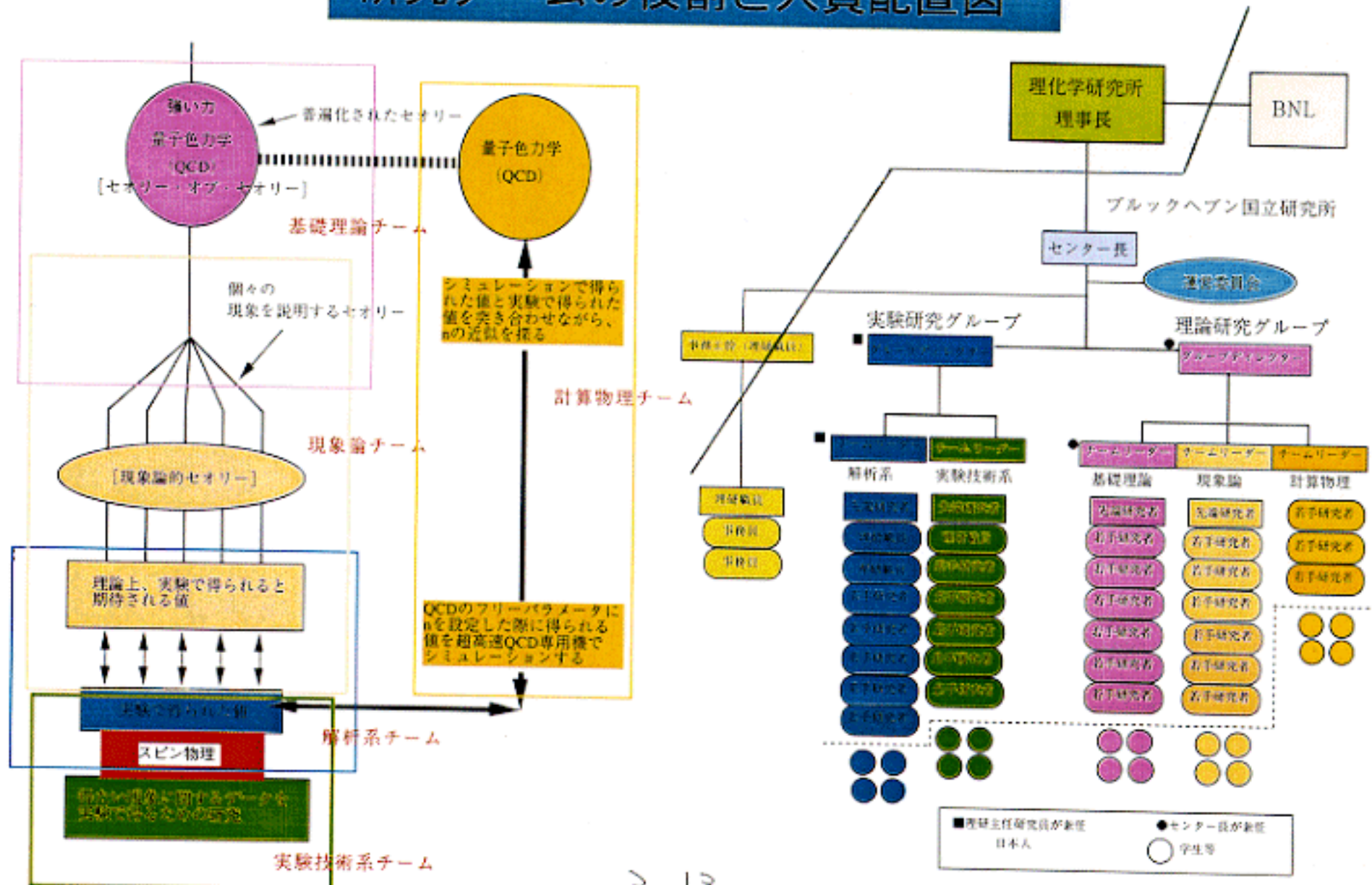


上記のクエンチングテストの結果

HRC001 (HELICAL DIPOLE) QUENCH TEST



理研BNL研究センターにおける 研究チームの役割と人員配置図



理研BNL研究センター（初年度）

平成9年 10月開所予定

設置場所：BNL物理部門

人員構成：

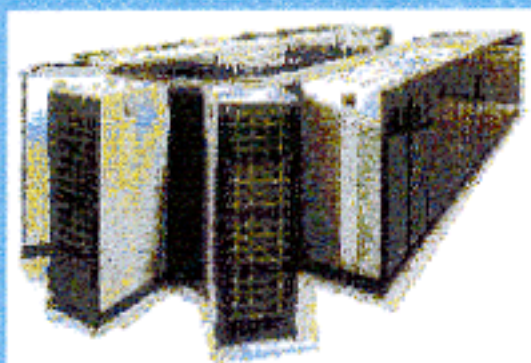
センター長	T. D. Lee教授（コロンビア大学）
副センター長	T.L. Trueman
理論グループ	
客員主管研究員	4名（内1名 日本人）
フェロー	2名（内0名 日本人）
ポスドク	4名（内2名 日本人）

実験グループ

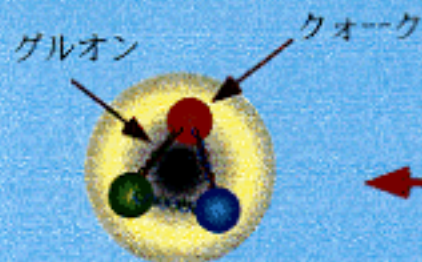
平成10年度 概算要求

専用計算機の開発

コロンビア大学と共同で大規模並列専用計算機（1T Flops）を開発する。時空を格子状に区切り、専用計算機で量子力学的波動関数を計算（格子QDC計算）し、素粒子の性質（質量、構造関数など）を求める。



大規模並列専用計算機



現実の世界の素粒子



格子QDC計算上での素粒子

大型放射光施設(SPring-8)の概要



SPring-8 全景



蓄積リング収納部に設置された電磁石



蓄積リング加速空間



ビームライン (基幹チャンネル部)



蓄積リングから発生した放射光 (中心の白い長方形が放射光)