

平成 13 年度原子力関係研究計画の概要

(原子力委員会御説明用資料)

平成 12 年 7 月 14 日

理化学研究所

理化学研究所原子力関係予算

平成 13 年度要求額 10,328 百万円 [平成 12 年度予算額 7,763 百万円]

1. RI ビームファクトリー計画の推進

これまでの成果

- ・ RI ビーム発生系施設の建設整備 (平成 9 年度～14 年度 [予定])
- ・ 実験棟詳細設計着手 (平成 12 年度～)

平成 13 年度計画

- ・ 実験棟建設着手
- ・ RI ビーム発生装置 [Big RIPS] 建設着手

2. 重イオン科学の推進

(1) 米国ブルックヘブン国立研究所 [BNL] との研究協力

これまでの成果

- ・ 検出装置等の建設整備 (平成 11 年度完成)
- ・ 理研-BNL 研究センター設立 (平成 9 年度～)
- ・ 先進データ処理システム [CC-J] の開発 (平成 11 年度～)

平成 13 年度計画

- ・ RHIC における本格的実験の開始
- ・ CC-J の本格的運用の開始

(2) 英国ラザフォード・アップルトン研究所 [RAL] との研究協力

これまでの成果

- ・ 最初の日英間大型科学協力プロジェクトとして高い評価
- ・ 世界最強のパルス状ミュオン実験施設の構築
- ・ 多岐にわたる研究成果：ミュオン触媒核融合、ミューエスアール等

平成 13 年度計画

- ・ 協力協定の延長：ミュオン科学における最先端研究を維持
- ・ ミュオン科学のエネルギー開発研究、生命科学研究等への展開

(3) 理研リングサイクロトロンを活用した研究

3. 重イオンビーム利用連携研究 [平成 13 年度新規施策]

4. 原子力基盤研究等の推進

- (1) 原子力用レーザー技術の開発 (平成 8 年度～14 年度)
- (2) 放射線リスク評価・低減化技術の開発研究 (平成 10 年度～15 年度)
- (3) 原子力基盤クロスオーバー研究 (第 3 期：平成 11 年度～15 年度)

5. バイオクロストーク機能研究 (平成 8 年度～17 年度)

RI ビームファクトリー計画の推進

理化学研究所

R I ビームファクトリー

- 元素誕生の謎にせまる
- 原子核の本質の理解へむけて



ベクレル

A. H. Becquerel

(1852 ~ 1908)

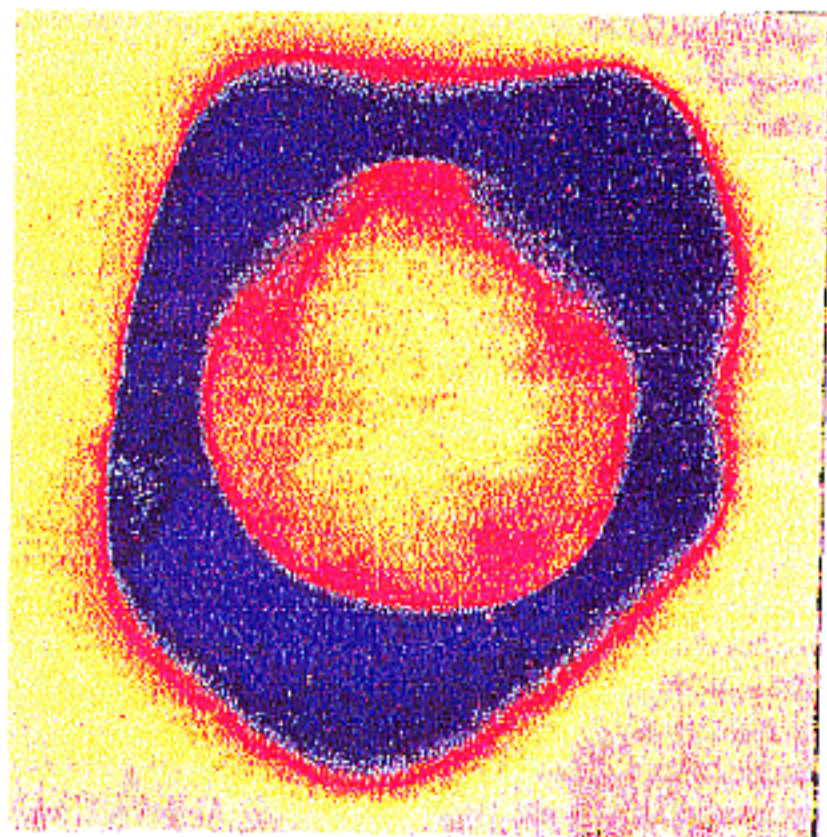
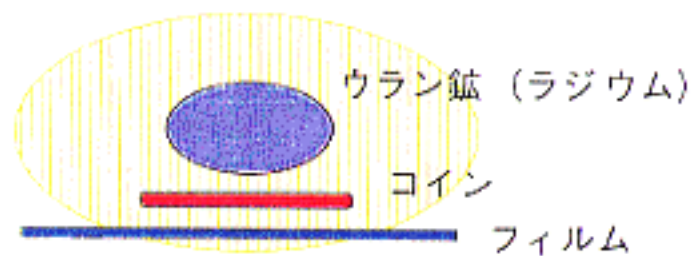
1896 年放射能を発見

1903 年ノーベル物理学賞

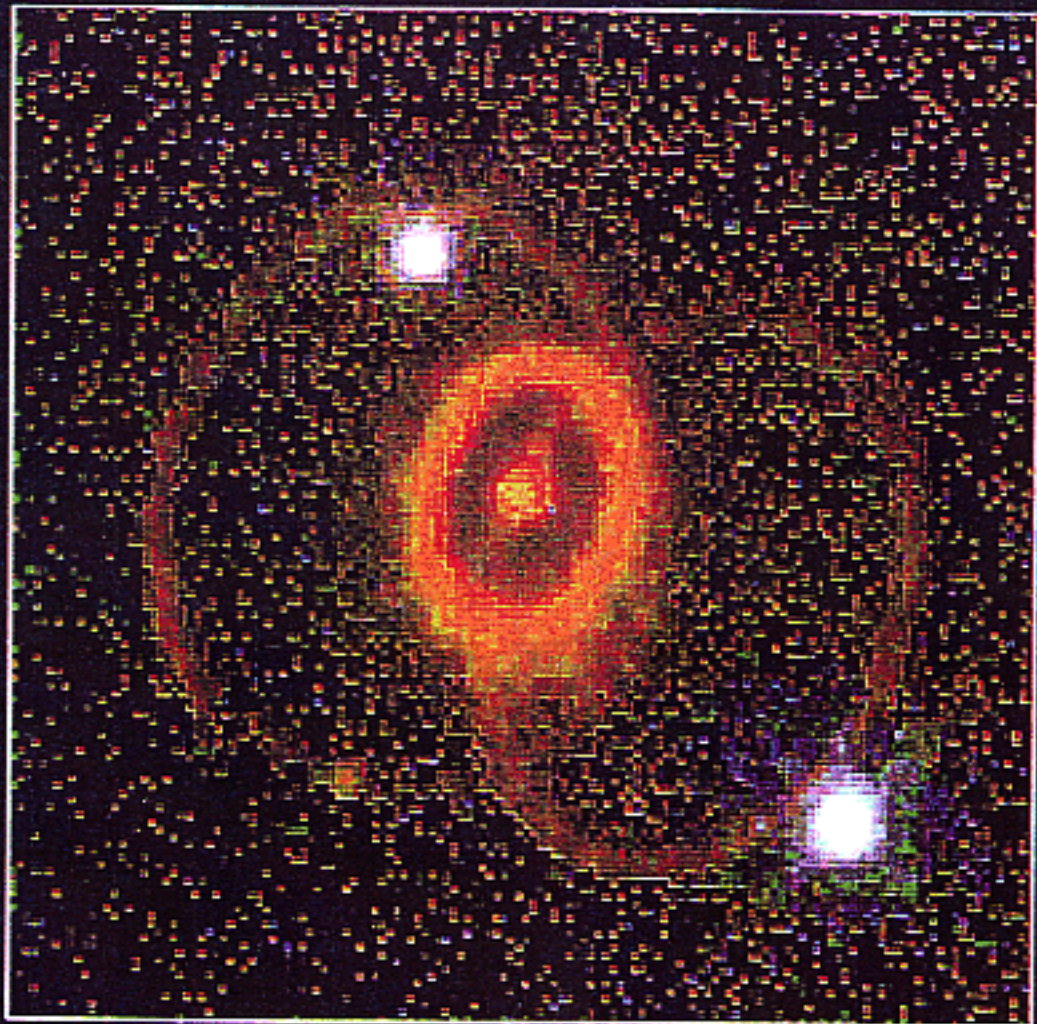


ベクレルの感光写真

コンピュータで画像処理 →
したもの



Supernova 1987A Rings



**Hubble Space Telescope
Wide Field Planetary Camera 2**



SPACE
TELESCOPE
SCIENCE
INSTITUTE

宇宙における元素合成

H, He, Li.

ビッグバン合成

恒星の誕生

太陽系
地球
人間

星間物質

低温燃焼

C, O, Ne ..

恒星の進化

Ne, Fe ..

高温燃焼

超新星爆発

U

遅い高温燃焼過程

Stable

Observed Unstable

高温燃焼

低温燃焼

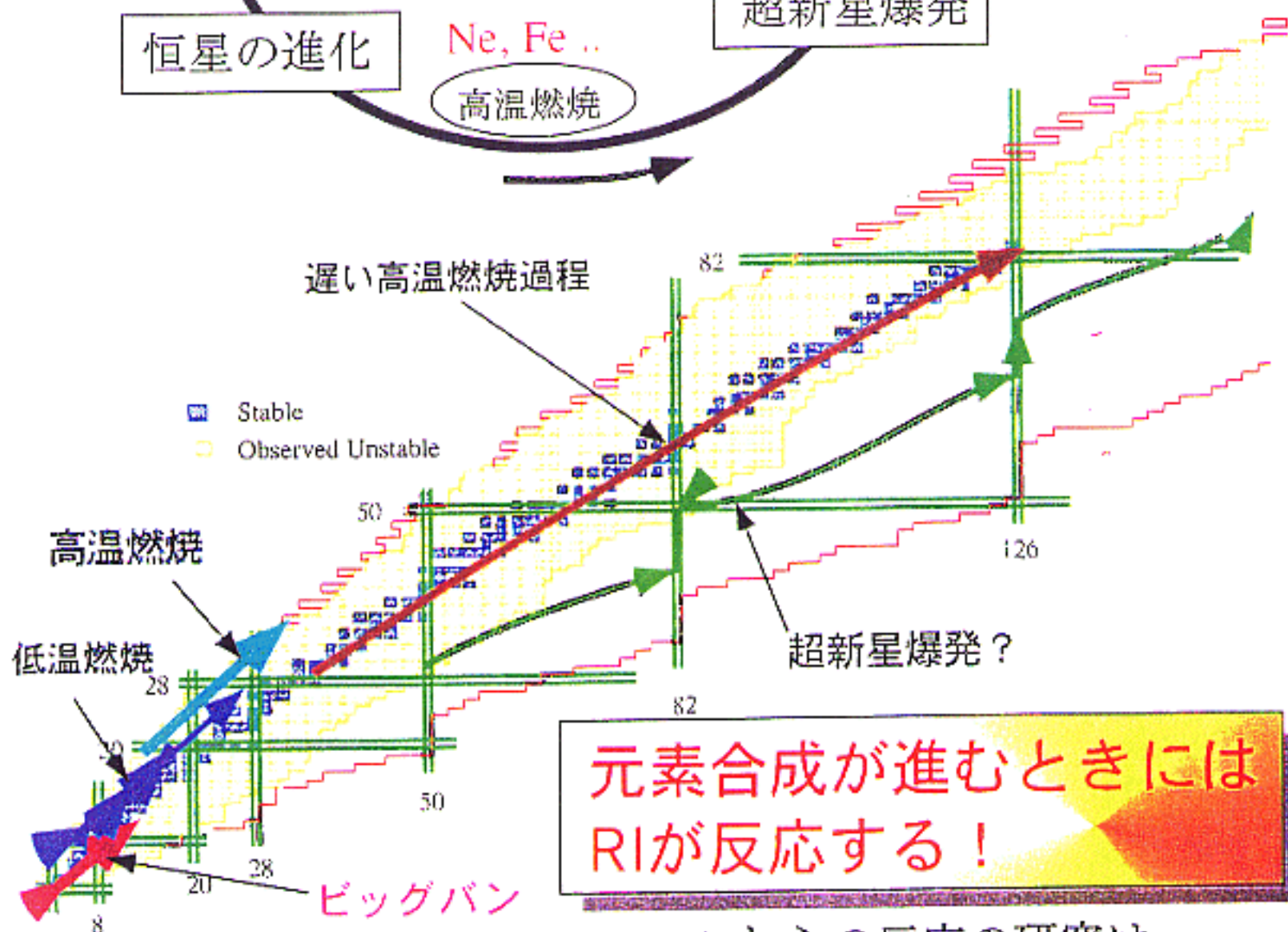
超新星爆発？

元素合成が進むときには
RIが反応する！

これらの反応の研究は
RIビームで初めて可能

半減期測定：SRC/RIPS

質量の測定：MUSES/ACR





谷畑勇夫

Tanihata, Isao

理研リニアック研究室

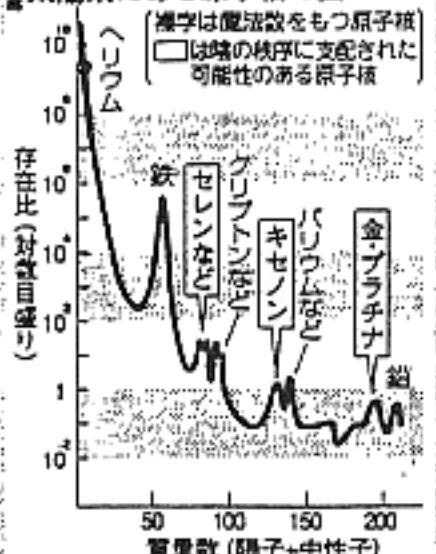
主任研究員

世界初の RI ビーム実験

(1984年)

Bevatron

太陽系にある原子核の量



貴金属が宇宙に多いなぞ解明 新しい魔法数を発見

中性子過剰の名残かも

原子核を構成する陽子や中性子が一定の数(魔法数)だと壊れにくく、魔法数をもつ元素は宇宙での存在量が多い。ところが、金やプラチナは魔法数をもたないのに意外に量が多い。理化学研究所グループがこのなぞを解く新しい魔法数を見つけた。七つしかないと言われてきた魔法数の定説を五十年前に覆した。宇宙には、新魔法数の原子核をもつ元素がもたらされ、金、プラチナがたくさんできるような「陰の秩序」が存在する可能性がある。

発見者は理研Riビーム科学研究室の谷畑勇夫主任研究員、小沢順研究員ら。

通常の原子核は、元素の種類ごとに陽子と中性子の数が決まっている。谷畑さんらは加速器で自然界にない中性子過剰の不安定な原子核を作って性質を調べているうち、全体の中性子が十五個か十六個のときに核が異常に大きくなる奇妙な現象に気づいた。実験データを集め、核の壊れやすさと中性子数との関係を解析した。

その結果、七個以上の余分な中性子をもつ原子核については、中性子の総数が

十六個のときに崩壊しにくく、ほかの数のときに比べ約十倍安定することが分かった。

これまで知られている魔法数は、二、八、二十、二十八、五十八、八十二、百二十六の七つ。これらの数に見合う中性子をもつヘリウム、酸素、カルシウムなどは安定しているため、いずれも宇宙の存在比率が高い。

実験から「16」浮上

中性子過剰の原子核について、十六が新たな魔法数として浮かんできた。この前後の八と二十は安定しないこともわかった。谷畑さんらは十六以外にも新しい魔法数があると考えている。

一九四九年、ドイツの研究グループが殻構造モデルによって魔法数を説明した。この理論はノーベル物理学賞を受けており、魔法数は七つだけと信じられてきた。

核では殻構造が変化し、新たな魔法数が生み出されるのではないかとみている。

鉄より重い原子核は、星の内部などで、もともとなる原子核がゆっくりと中性子を獲得し、同時にベータ崩壊によって陽子に変わる反応を経て生まれる。

「陰の秩序」あり? しかし、大爆発を起こしている超新星などでは、大量の中性子が原子核にぶつかってくっつくことがあ

る。そのときはベータ崩壊が追いつかず、中性子過剰核になってしまふ。ここに新魔法数をもつ「陰の秩序」があると推定される。

太陽系にある元素の原子核では、従来の魔法数をもつものは周辺の元素より存在比が高い。図。

それ以外では、「陰の秩序」のものでできたと思われる金、プラチナ、セレン、セレンなどが多い。谷畑さんは「未知の魔法数に基づき大量に生まれた中性子過剰核が崩壊した結果が

もしない」と話す。

加速器で新数探る

理研は二〇〇四年に完成する予定の加速器「Ri(放射性同位元素)ビームファクトリー」を使い、もっと重い過剰中性子核を作

って、十六より大きな新魔法数を探る計画だ。

今回の研究は二百冊の米物理学誌「フィジカル・レビュー・レターズ」に掲載される。

(RI ビーム科学研究室)

重イオンビーム → R I ビーム R I B F

↑ 「これを高強度にすれば
元素合成の謎が解ける」

陽子ビーム → 中性子ビーム、 原研・K E K
ミューオンビーム、
ニュートリノビーム

↑ 「ニュートリノ振動の謎を解く」

電子ビーム → 放射光 S P r i n g 8



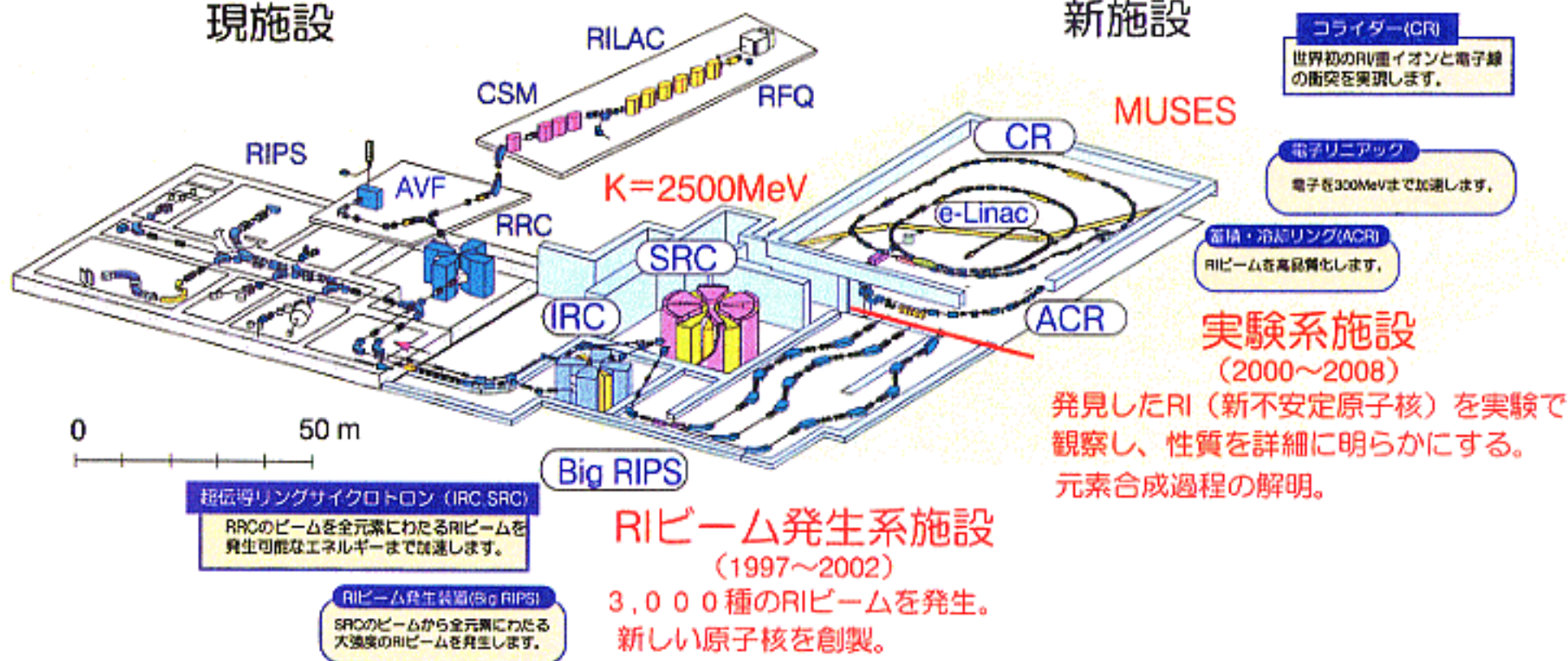
現施設

建設地

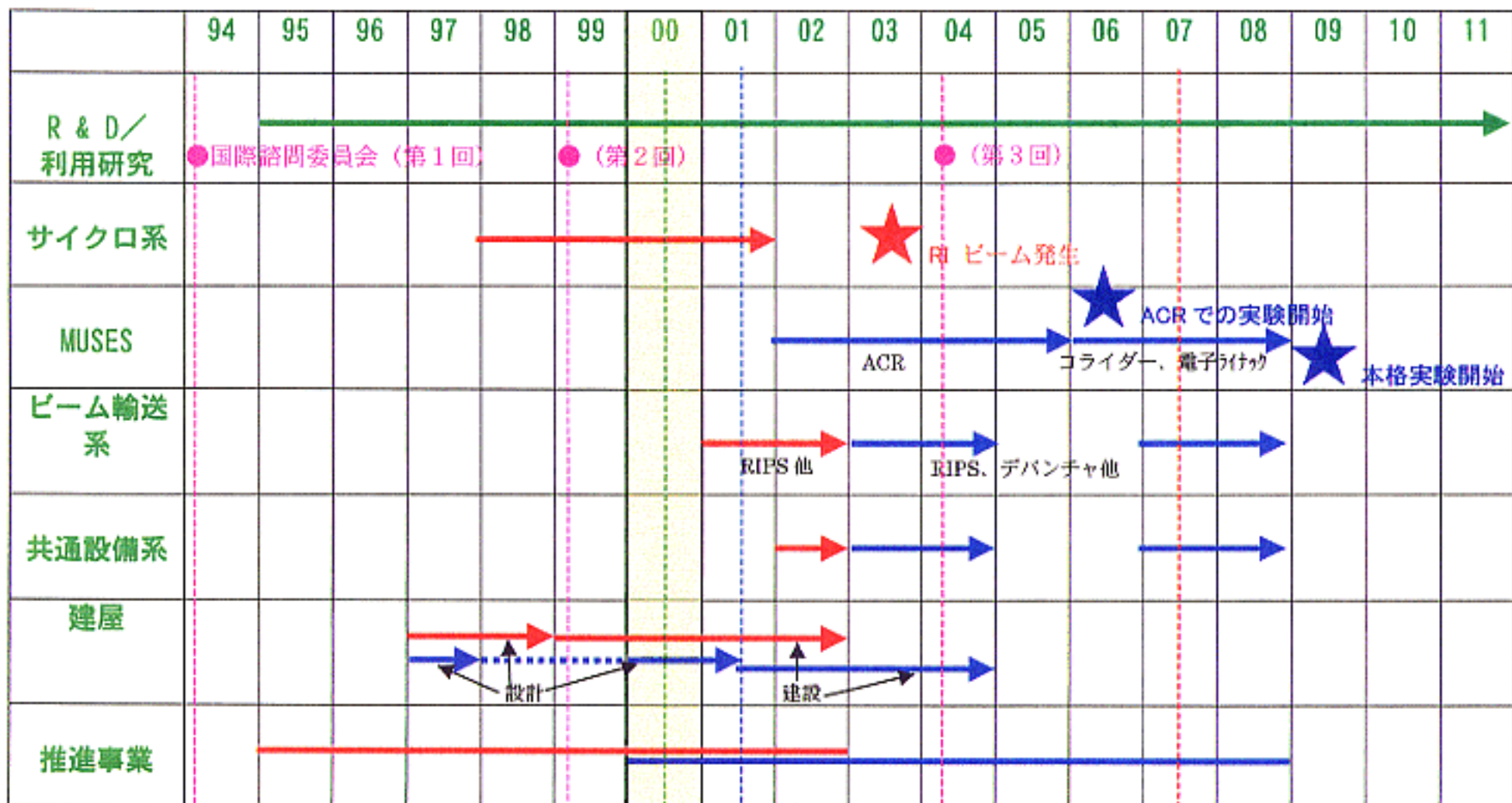
RIビームファクトリー概念図

現施設

新施設



RIBF 年次計画



→ : 1st Phase: RI ビーム発生系施設

→ : 2nd Phase: 実験系施設 (MUSES)

GSI 77° グレード 施設稼動

RIA 計画施設稼動

MSU 77° グレード 施設稼動

国際競争

対「理研 R I ビームファクトリー」

欧州

● ドイツ国立重イオン加速器研究所 (G S I)

米国

● Rare Isotope Accelerator (R I A)

Nuclear Structure with Exotic Beams

D. Habs

Status of RIB-facilities + GSI-upgrade

Intense high energy beams
with ions of low charge state

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

Physics with Exotic Beams

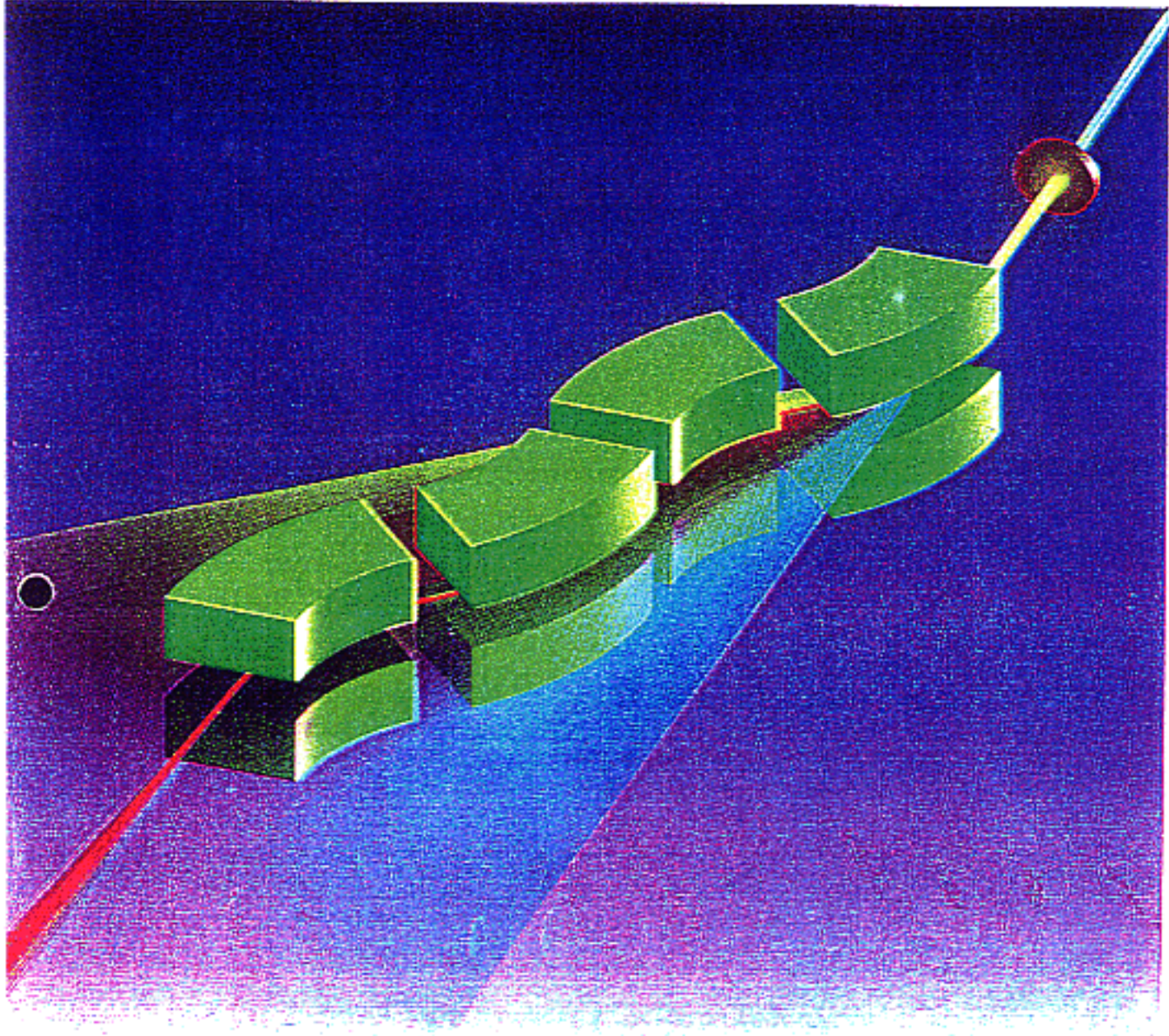
- i) Super heavy elements
- ii) Physics at the drip line
- iii) Shell structure far from stability

Production Rates

Nuclear Structure with Energetic Radioactive Beams

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

Conclusion



Scientific Opportunities with
Fast Fragmentation Beams
from the Rare Isotope Accelerator

March 2000

The RIA Facility in Worldwide Context

Worldwide, several first-generation ISOL-type facilities currently operate, as do four facilities of the in-flight fragmentation type: the National Superconducting Laboratory (NSCL) at Michigan State University, RIKEN in Japan, GANIL in France, and GSI in Germany. Upgrades of some of these facilities are currently in progress. RIA will build on the pioneering work at all these facilities, advancing the state of the art by several orders of magnitude through a combination of increased intensities and much wider variety of high-quality rare-isotope beams. In the United States there is currently one fragmentation facility, NSCL, and one ISOL facility, the Holifield Radioactive Ion-Beam Facility (HRIBF) at Oak Ridge National Laboratory. Two other facilities also conduct research with accelerated rare-isotope beams, ATLAS at Argonne National Laboratory and the 88-Inch Cyclotron facility at Lawrence Berkeley National Laboratory. Development at these facilities to date and in the years prior to RIA commissioning will provide crucial technological and scientific input.

Particularly significant facility upgrades are in progress at RIKEN and at TRIUMF in Canada. These are described below and compared with RIA.

RIKEN RI Factory vs. RIA

The new RIKEN RI Factory in Japan will accelerate light ions (up to mass 40) to 400 MeV/nucleon and uranium ions to 150 MeV/nucleon. The complex uses an ECR ion source, a linac injector, and a cascade of three cyclotrons.

The 1998 Linac Conference paper of O. Kamigaito, et al., on the RIKEN injector design discusses the ion source/injector/stripping scheme. For uranium ions they plan to use 22^+ ions from the source and a single carbon stripper foil at 3.8 MeV/nucleon, with a 12% stripping efficiency. They expect to achieve beam currents of 0.1 μA for uranium beams at 150 MeV/nucleon, corresponding to 3 kW uranium beam power. The corresponding numbers for uranium at RIA, assuming similar source performance, are 100 kW beam power at 400 MeV/nucleon. The combination of increased energy and current for the uranium beams of RIA implies 300 times more yield of rare isotopes produced via in-flight fission. For lighter ions like oxygen-18, RIA can produce up to 40 times the current at somewhat higher energy, 500 MeV/nucleon vs. 400 MeV/nucleon. The RIKEN RI Factory is designed for 1 μA of ions in this lower mass range.

At present the RIKEN RI Factory is only proposed as a fragmentation facility. No plans have been announced to stop and reaccelerate fragments, as proposed for RIA. Their emphasis is on doing physics directly with high-energy fragments—a capability that is also recommended for RIA—as well as in storage rings with fixed internal targets and intersecting beams.

ISAC-II vs. RIA

At TRIUMF in Canada, the upgrade of ISAC-I to ISAC-II comprises a major upgrade of the post-accelerator. The ISOL production complex is unaffected. The post-accelerator will have its energy increased from 1.5 to 6.5 MeV/nucleon and the mass range extended to approximately 150 u. It will require the addition of a charge-state booster prior to the RFQ and will still use a carbon

「史上最強のサイクロトロン建設」

S R C : 世界初の超電導リングサイクロトロン

●ベンディング・パワー : $K = 2500 \text{ MeV}$

●自己漏洩磁場遮蔽型

●自己放射線遮蔽型

RI ビームファクトリー
全元素にわたる世界最大強度/高エネルギーRI ビーム

現在のリングサイクロトロンでの研究

超重元素及び新不安定同位元素の研究

高温・高密度原子核の研究

中間子・ミュオン粒子、中性子の発生と応用

不安定核ビームを用いた核科学の研究

高エネルギー高電離重イオンによる原子物理の研究

重イオンによる生物効果研究

ブルックヘブン国立研究所
世界最高エネルギー重イオン
衝突型加速器 RHIC
＜スピン物理研究/理研 BNL
研究センター＞



ラザフォードアップルトン研究所
世界最高強度パルス状陽子加速
器 ISIS
＜ミュオン科学/理研 RAL 支所＞



重イオン利用連携研究

米国ローレンスバークレイ国立研究所

(重イオン/RI ビームの先端実験技術)

高効率核反応測定技術の開発

＜「4 π 検出器系」の開発＞

(第2回 RIBF 国際諮問委員会での指摘事項)



東京大学原子核科学研究センター分室

平成12年3月22日理化学研究所和光本所内に設置
(中・低エネルギー領域の原子核研究)

プラズマと重イオンの相互作用研究

＜重イオン慣性核融合＞



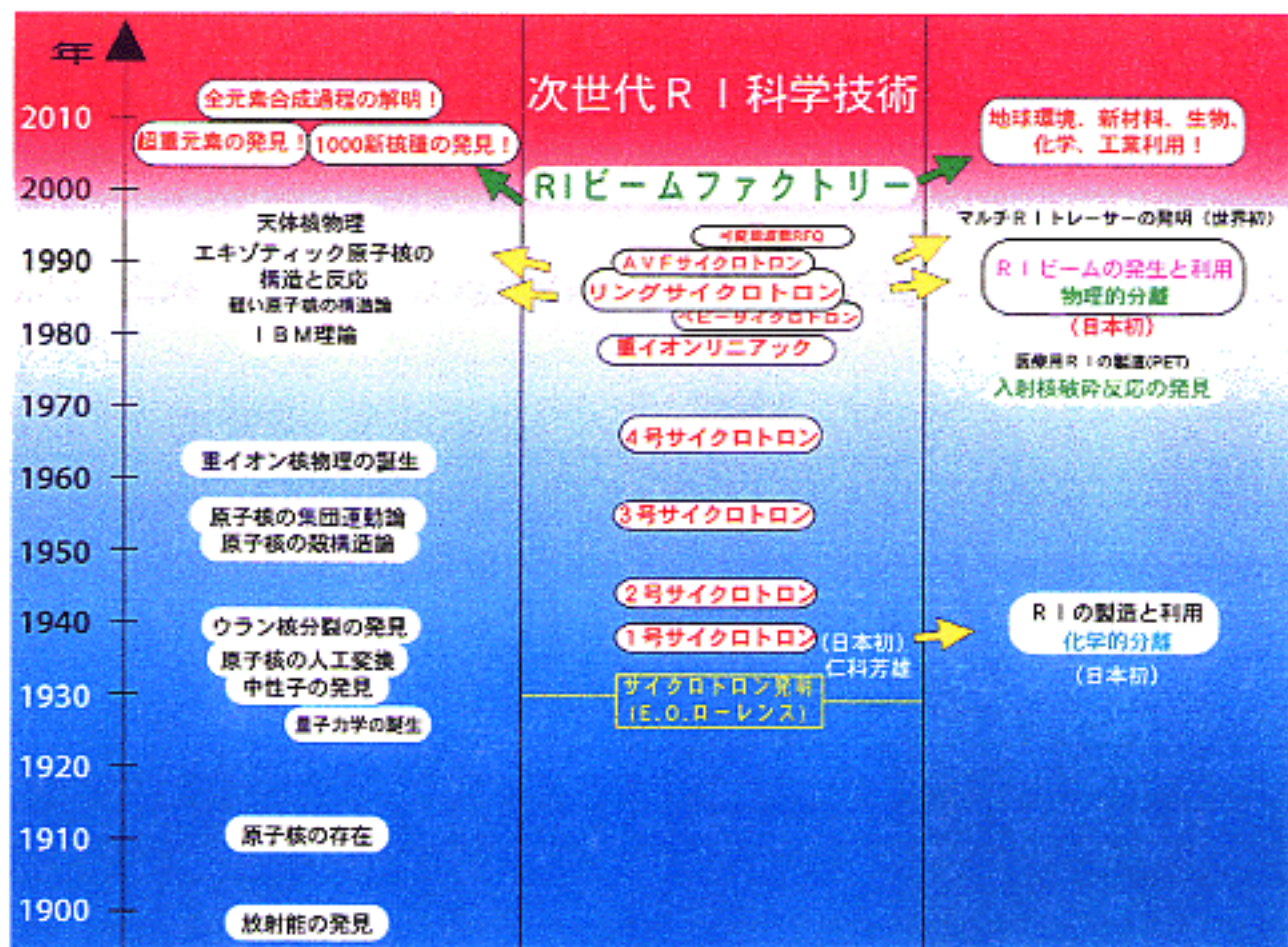
付録：参考資料

加速器の歴史とRI利用の発展

RIを人工的に製造できるようになったのは、1930年代のことです。これを可能にしたのはサイクロトロン、バンデグラフなどの加速器の発明で、その製造法は低エネルギーの陽子・重陽子ビームを物質に照射し、生成したRIを化学的に分離する方法によるものです。その後、加速器技術の進歩にともなって大強度・高エネルギーの重イオンを加速できるようになり、1980年代には入射核破砕反応で生成したRIを物理的な方法で分離してビームにする「RIビーム」発生技術が開発されました。RIビームには革新的な応用分野があるため、これを利用した研究が今や世界的な潮流となって発展しつつあります。

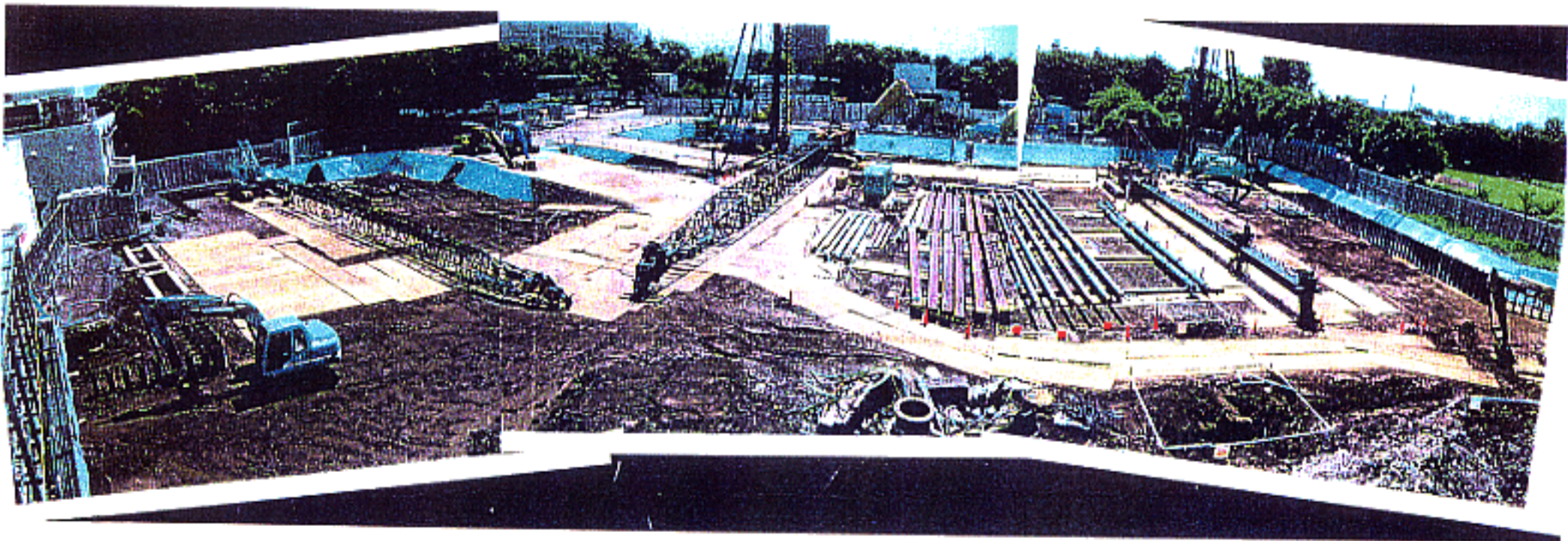


ラジオアイソトープ利用
50周年記念切手 (1990)

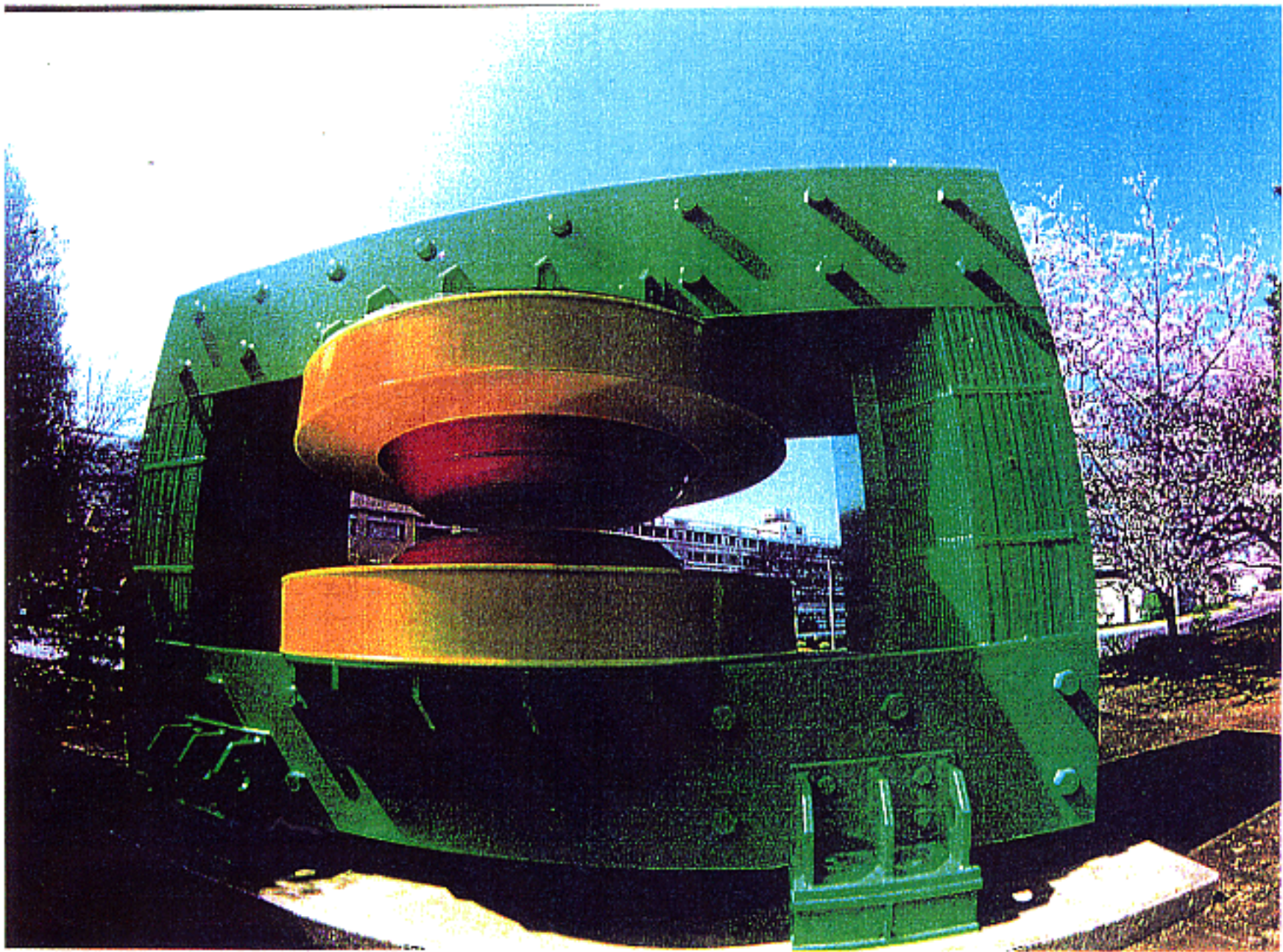




リングサイクロトロン



R1ビームファクトリー建設工事（平成12年7月）



理研第4号サイクロトロン（1966年～1990年）

米国ブルックヘブン国立研究所との研究協力

「スピン物理」プロジェクト

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96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実施取り決めの下、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)

年次計画表

1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003
April April April April April April April April

素粒子対検出装置 I
素粒子対検出装置 II
スピン偏極制御装置



素粒子対検出装置 I

素粒子対検出装置 II

スピン偏極制御装置

RHIC 実験



RHIC実験(重イオン衝突)

RHIC 実験(偏極陽子衝突)

理研 BNL
研究センター



理論グループ

実験グループ

先進データ処理
システム (CC-J)



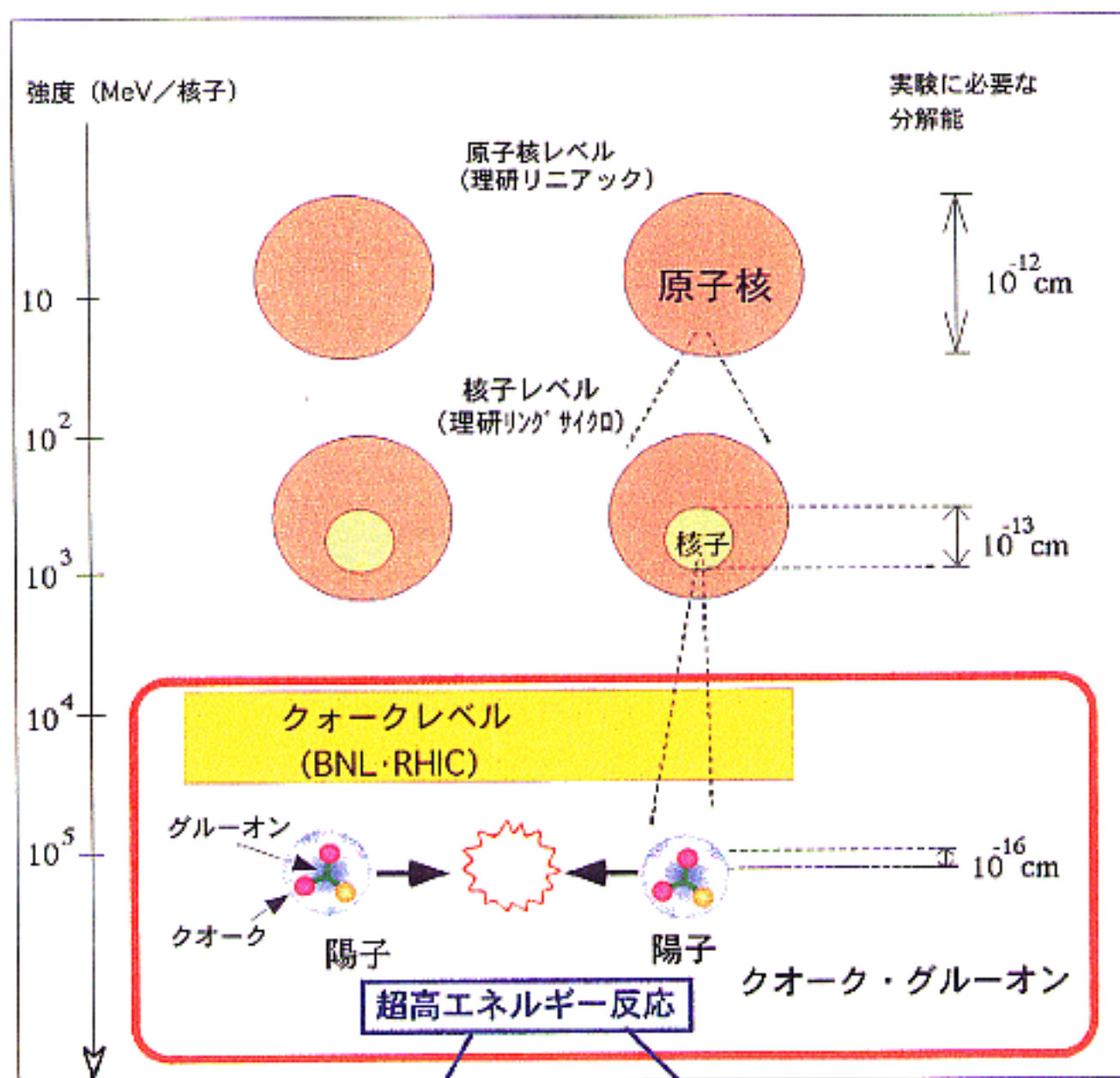
CC-J 開発

CC-J 運用

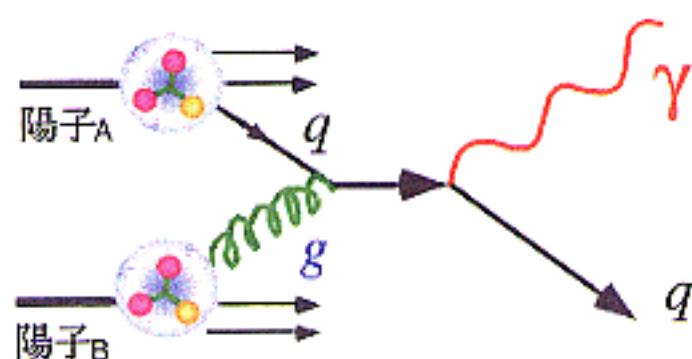
「スピン物理」が明らかにする極微の世界

100GeV／核子以上の超高エネルギーでのスピン偏極した陽子と陽子、あるいは陽子と重イオンの衝突から生じる反応を研究すると、 10^{-16}cm 以下の極微の世界における、通常は核子に閉じ込められたクォークやグルーオンのふるまいを観ることが出来る。スピン物理はクォークやグルーオンの運動の成り立ちをスピンを指標として明らかにし、「強い相互作用」による物質形成の謎を解き明かす。

〔加速エネルギーと観察可能な粒子サイズ〕



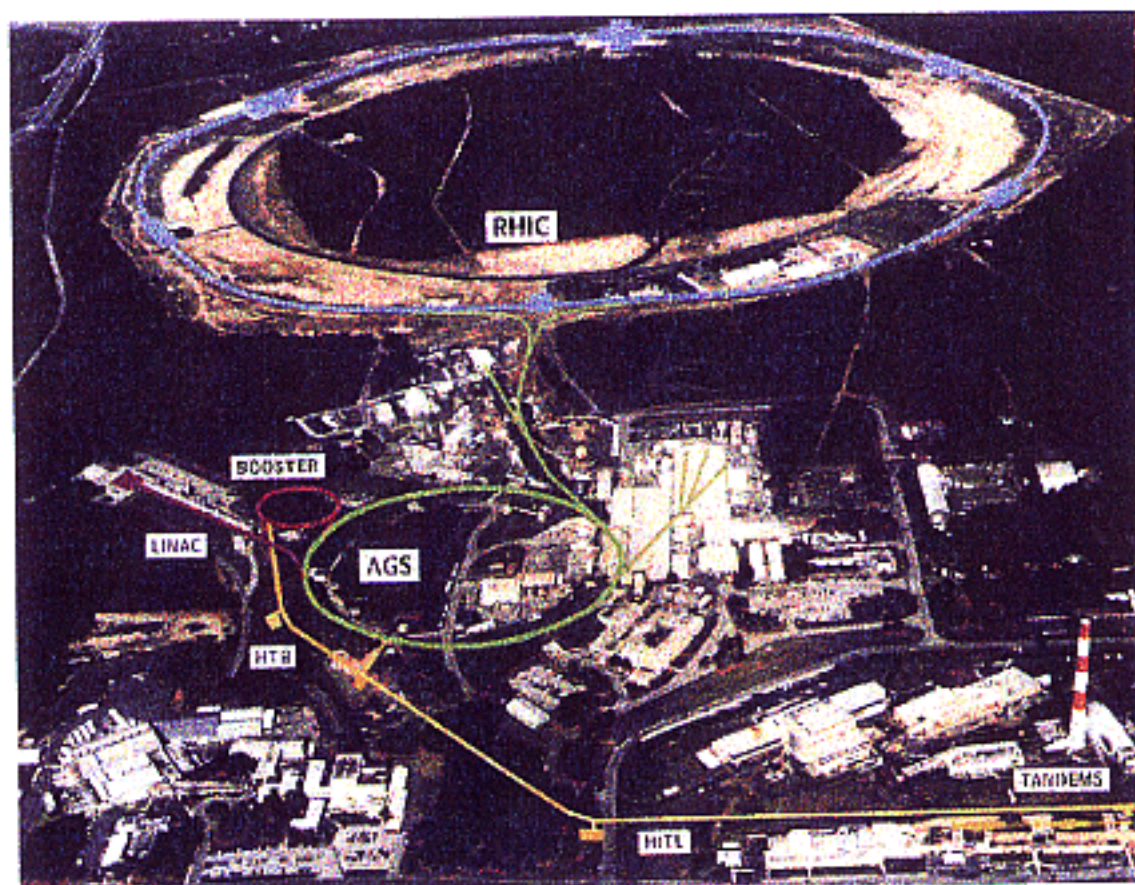
グルーオン・コンプトン過程



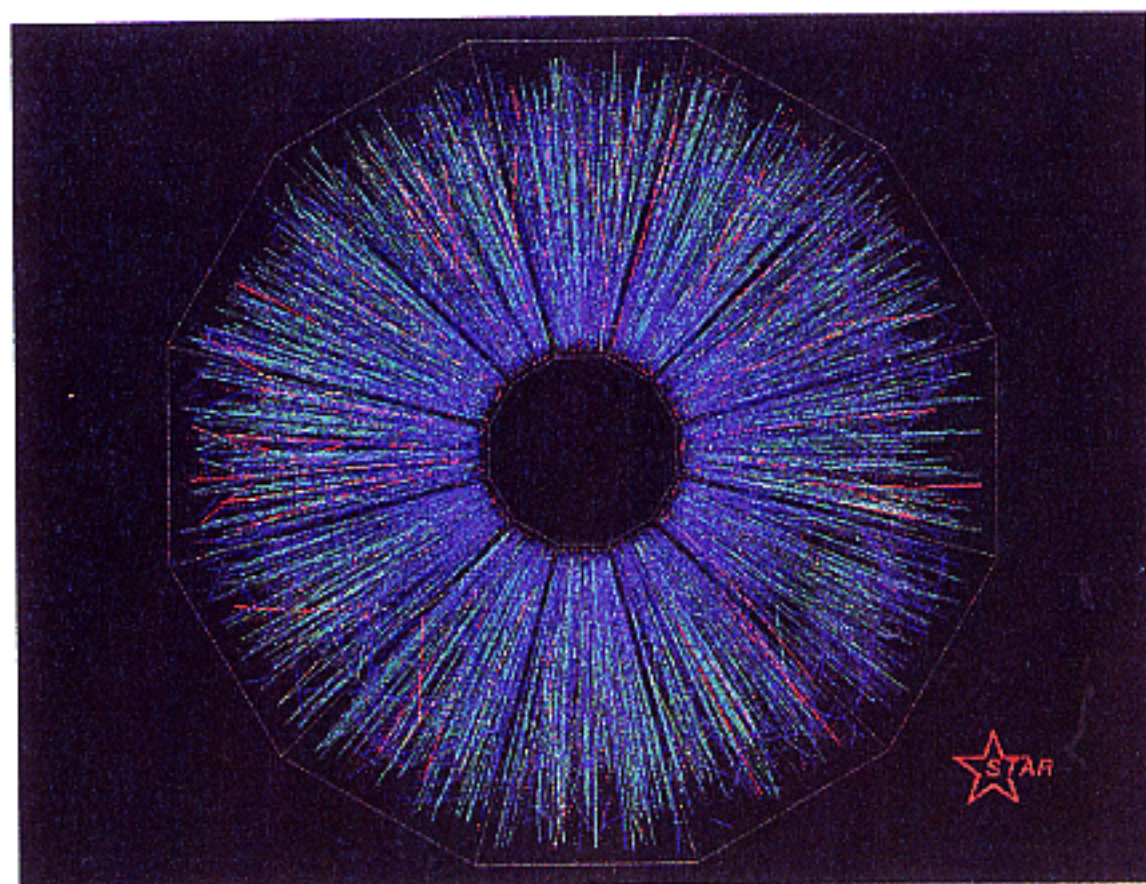
グルーオン融合過程



超高エネルギー衝突加速器(RHIC) (米国ブルックヘブン国立研究所)



RHIC加速器 円周長 3.8 km : 1999年10月完成

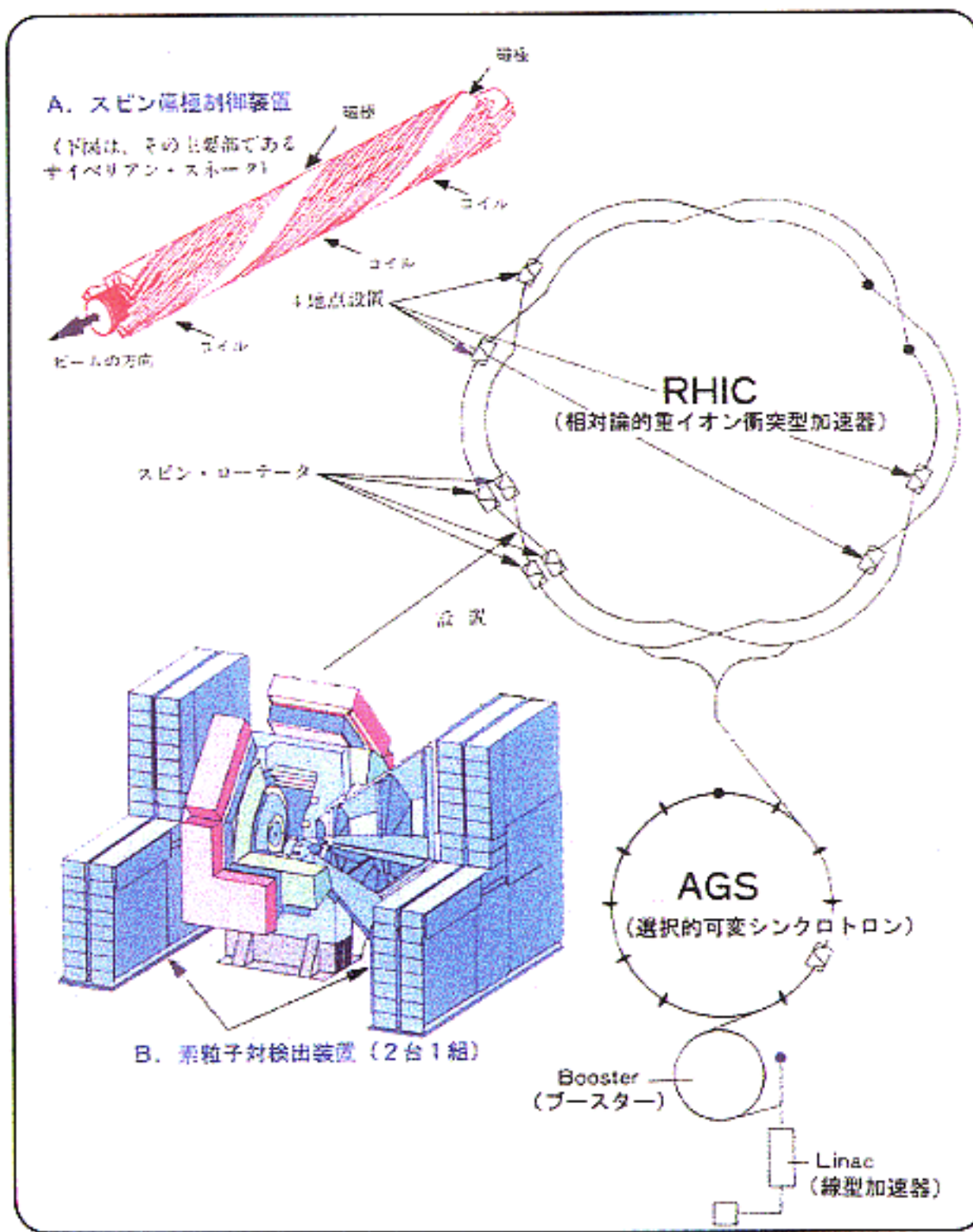


2000年6月 初めて観測に成功した金と金の原子核（核子あたり 30GeV）の衝突の例。

「スピン物理」プロジェクト：

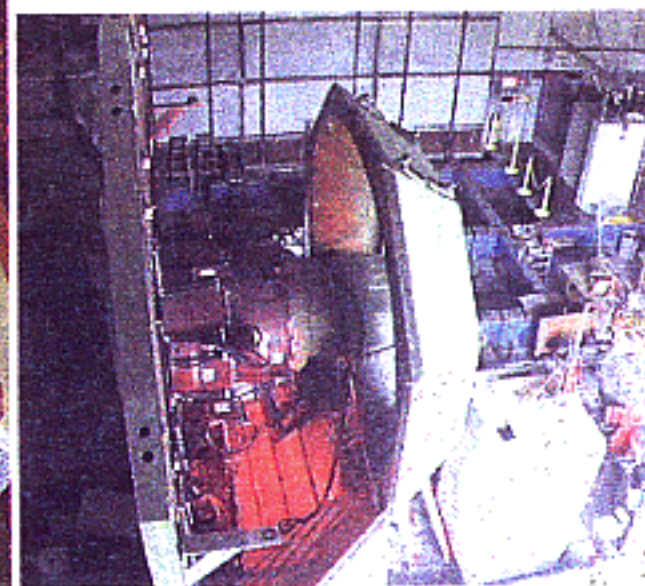
RHIC加速器を用いて、偏極陽子（250 GeV）+ 偏極陽子（250 GeV）衝突を観測し、陽子の内部構造を解明する。

「スピン物理」プロジェクト基幹実験装置（1995-1999年度製作）



完成したスピン偏極制御装置

素粒子対検出装置のミュオン電磁石



完成した素粒子対検出装置

英国ラザフォード・アップルトン研究所との研究協力

国際研究協力の推進

★中間子・ミュオン粒子、中性子の発生と応用

英国ラザフォード・アップルトン研究所との 国際研究協力

(平成 12 年度原子力委員会)

第 I 期：1990－2000

1990－1994 施設建設

1995－ 利用研究

☆第 II 期：2001－2010

☆第 I 期計画の延長

(待機) 新ファシリティの建設

(支援) 原研-KEK 大強度陽子加速器計画

理化学研究所ミュオン科学研究室
理研-RAL 支所

理研 RAL ミュオン施設；

世界最強のパルス状ミュオン施設

ミュオンとは何か

宇宙線中に発見された寿命 $2.2\mu\text{s}$ 素粒子で、加速器で大量に生成される。物質中では主として電磁気力がはたらき、

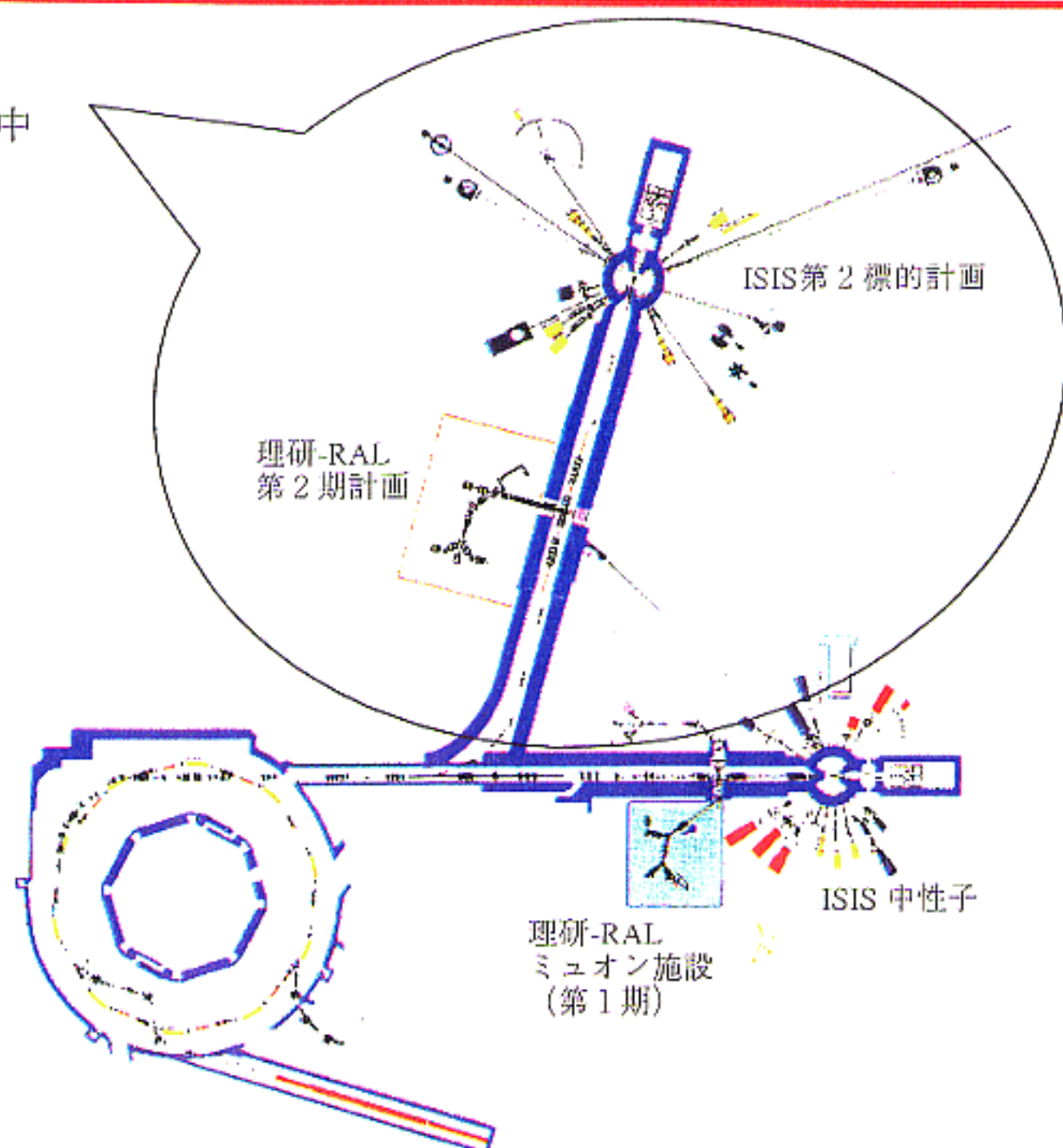
μ^+ ：“軽い陽子”、 μ^- ：“重い電子”、としてふるまう。

加速ビームによりパイオン (π 、寿命 26 ns 、湯川中間子) が生成され、つづいてパイオンの崩壊によってミュオン (μ) が生成される。



ISIS 加速器によるミュオンの大量発生と理研 RAL ミュオン施設

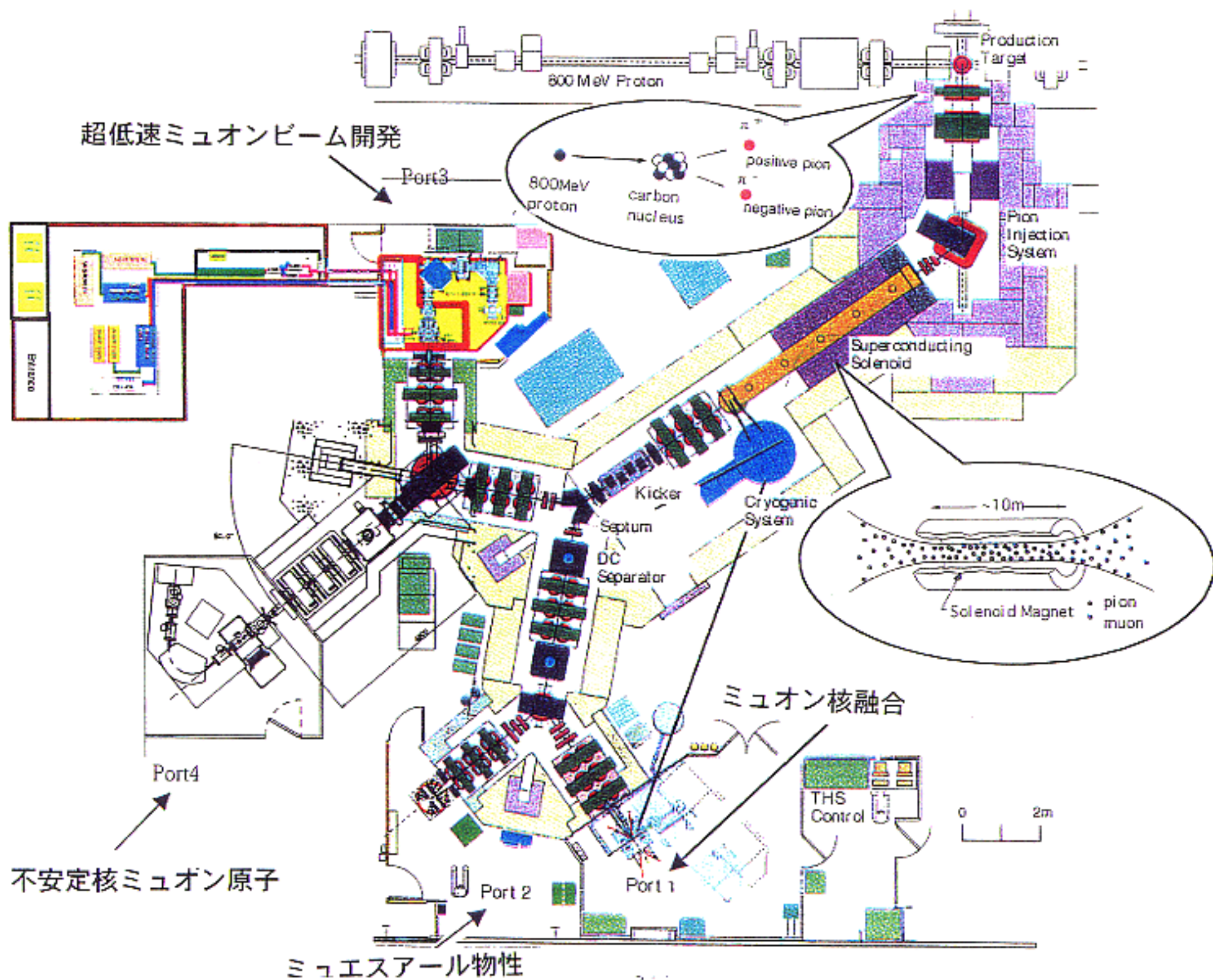
待機中



Stacked bar chart showing the number of uses (使用回数) from 1995/2 to 1999/2 for various categories. The y-axis ranges from 0.0 to 160.0. The x-axis shows years from 95/2 to 99/2. The bars are stacked with different patterns and colors for each category.

年度	英国側使用	ビーム調整・開発	ミュオン触媒核融合	mSR 高温超伝導体	mSR 半導体	mSR 高分子	mSR 金属	mSR 生命科学	熱ミュオニウム	ミュオン寿命測定	合計
95/2	12	0	0	0	0	0	0	40	0	0	52
96/1	20	0	0	0	15	10	0	0	0	0	45
96/2	0	0	0	0	38	10	0	0	5	0	53
97/1	15	0	5	0	30	25	0	0	45	0	120
97/2	18	0	20	10	20	25	0	0	15	5	103
98/1	15	0	20	0	20	35	0	0	0	35	105
98/2	12	0	5	0	15	55	0	0	60	0	147
99/1	0	0	30	0	0	0	0	0	0	48	78
99/2	18	0	5	0	25	20	0	0	0	5	80

ISIS 加速器によるミュオンの大量発生と理研 RAL ミュオン施設



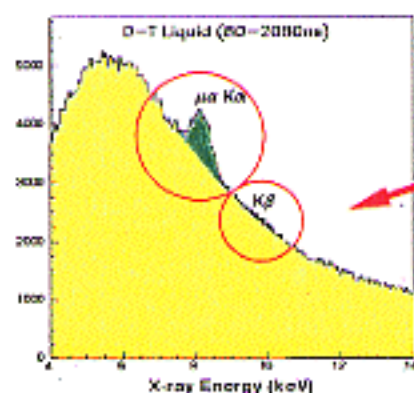
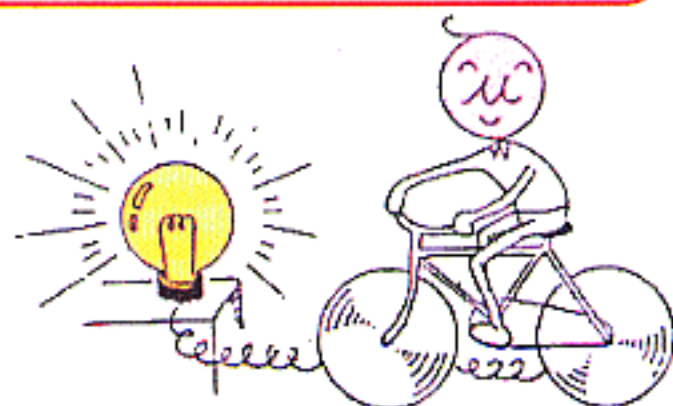
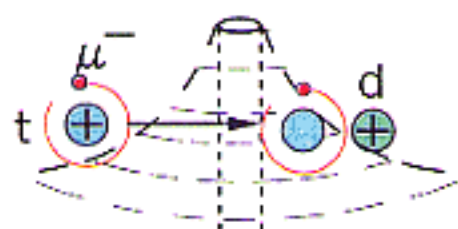
ミュオン触媒核融合：現状と次期計画

原理：小さな中性原子の生成とクーロン障壁の消失

ミュオンの寿命中の巡回反応継続とアルファ付着による停止

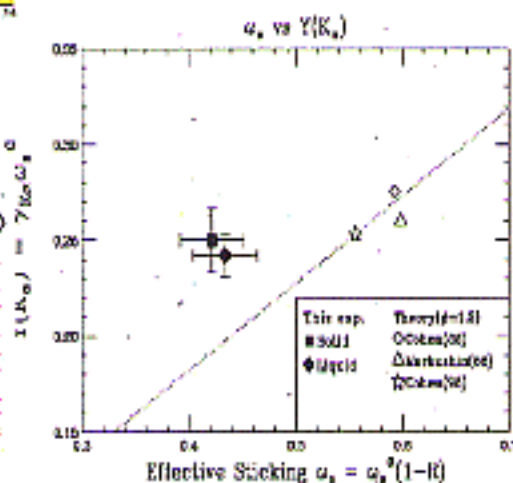
ミュオン触媒核融合

小さな中性原子を作り
クーロン障壁が消える

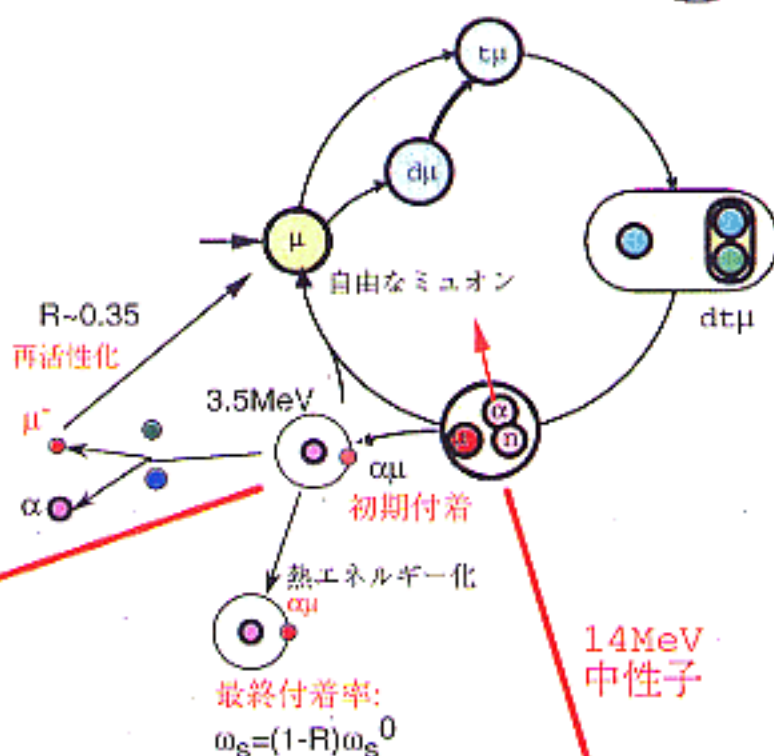


K_{α}, K_{β}
X線

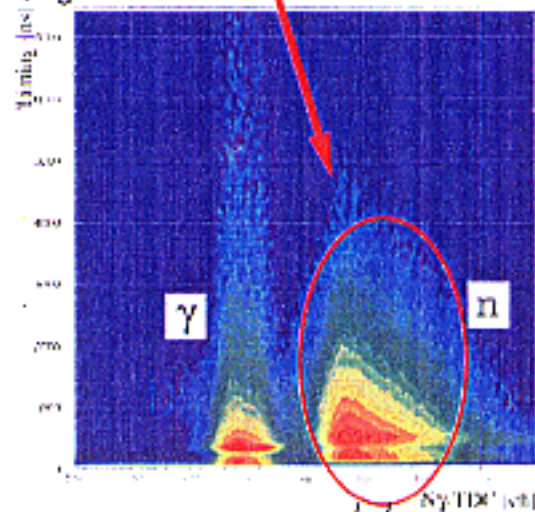
初期付着率



はぎとり後の
最終付着率



14MeV
中性子

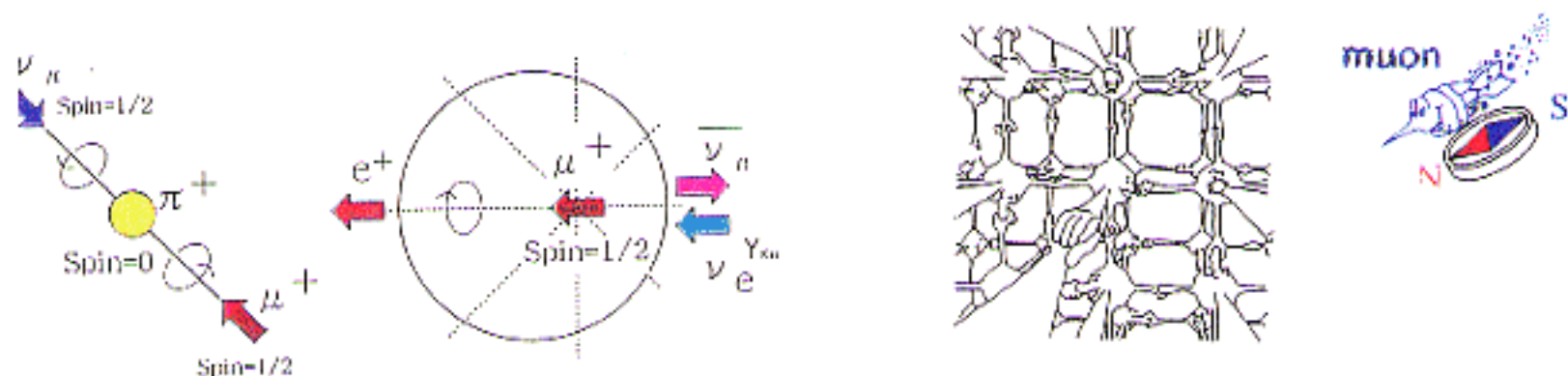


λ_n, γ_n

理研RAL実験の成果：アルファに付着したミュオンの異常電離現象の発見、ブレークイーブンへの指針

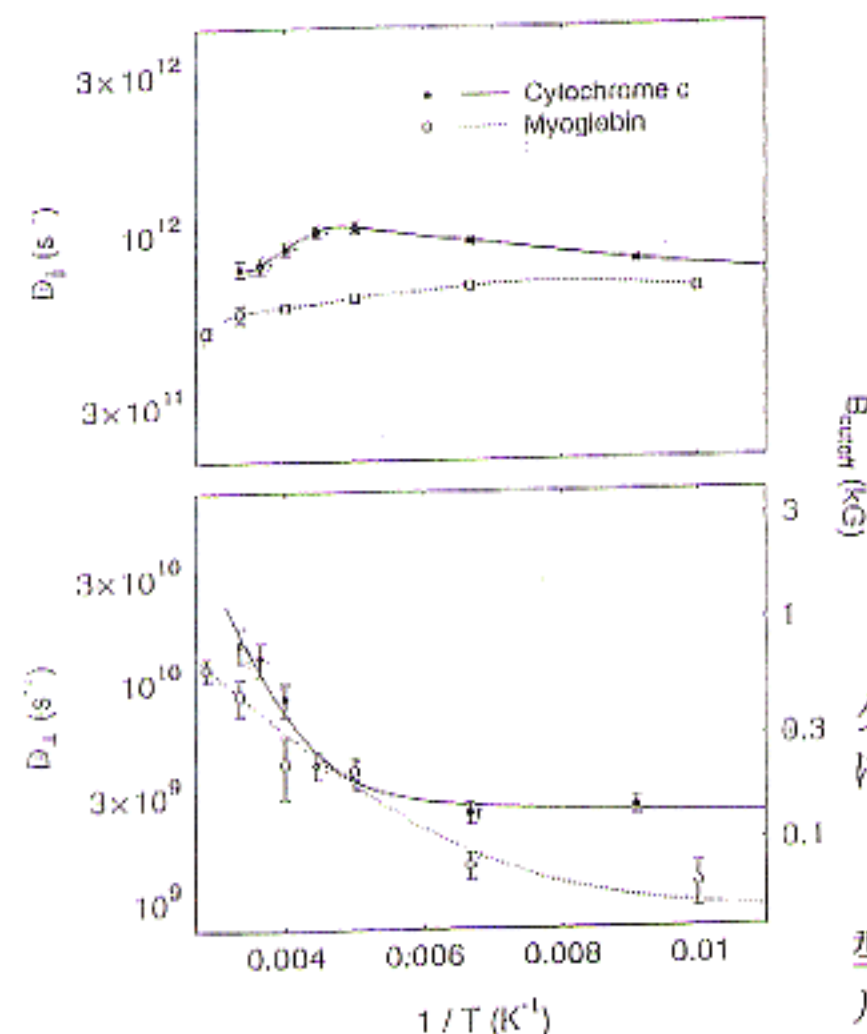
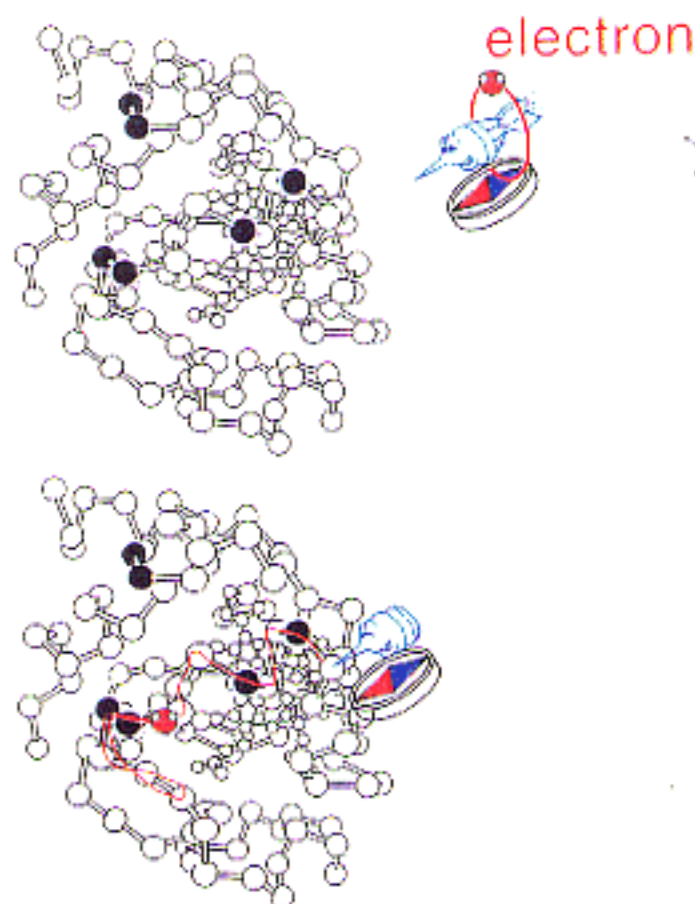
ミュオンによる生命科学研究

微視的磁場を探るコンパス；ミュエスアール法



電子ラベリング法による蛋白質中の電子伝達の観測

正ミュオンは減速過程で電子を捕らえて中性ミュオニウムとなり、熱エネルギー化して分子と化学結合する。その電子は、蛋白質の特性に応じて運動する。スピン双極子相互作用で電子の運動を微視的に観測することが



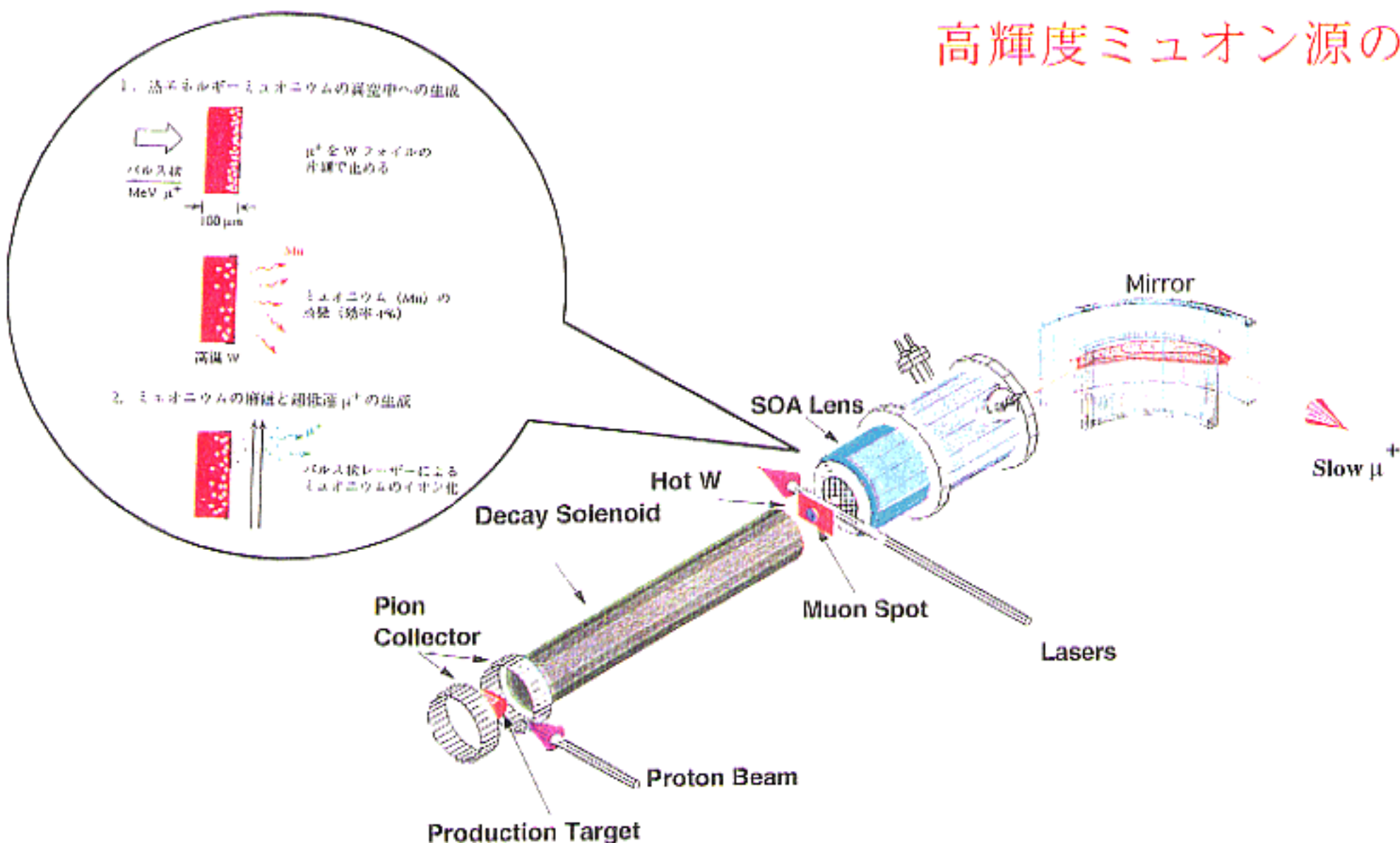
電子伝達をすることで知られているチトクロムc、酸素伝達を担うミオグロビンでは、温度によらない鎖上での高速電子伝達 (ps/サイト) が観測された。

鎖間伝達は遅く (ns/サイト) 熱活性化型で、チトクロムcの場合は蛋白質のコイル運動の“ガラス転移”と連動している。

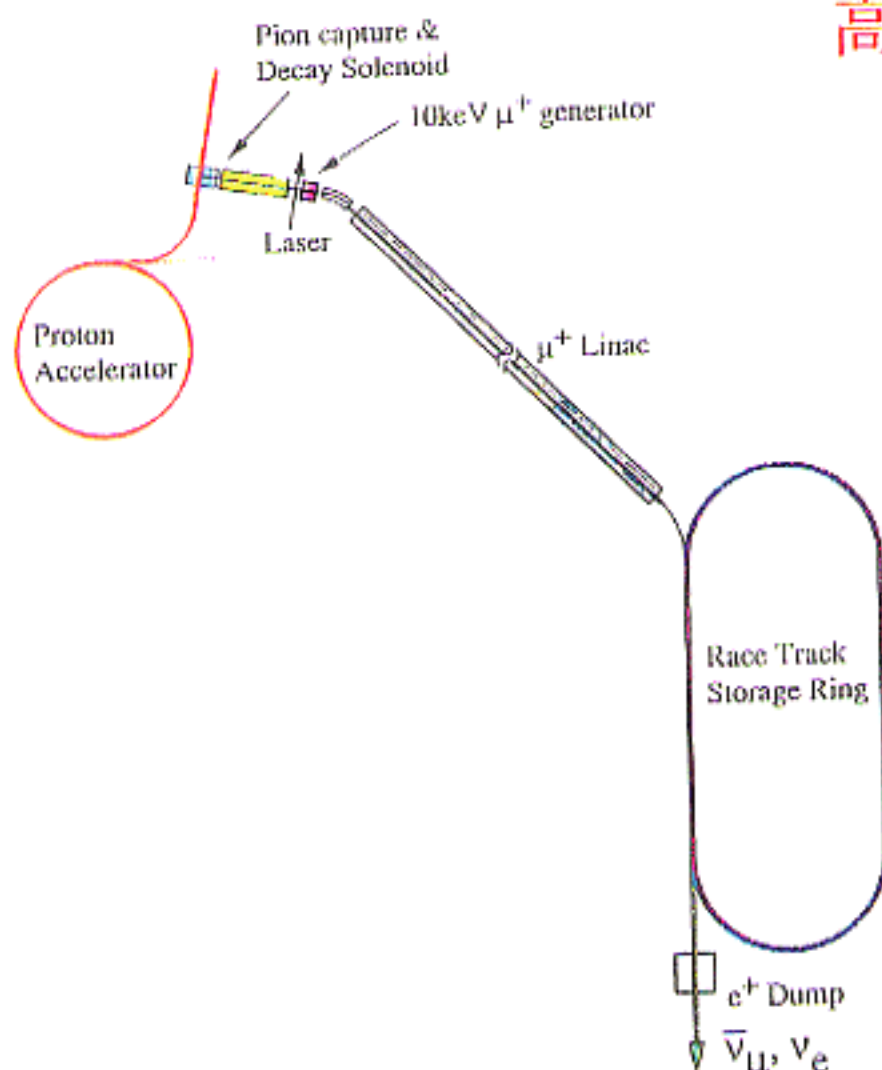
-理研-RAL での新しいミュオン科学研究-

超低速正ミュオンの大量生成と ニュートリノ源への利用

高輝度ミュオン源の生成



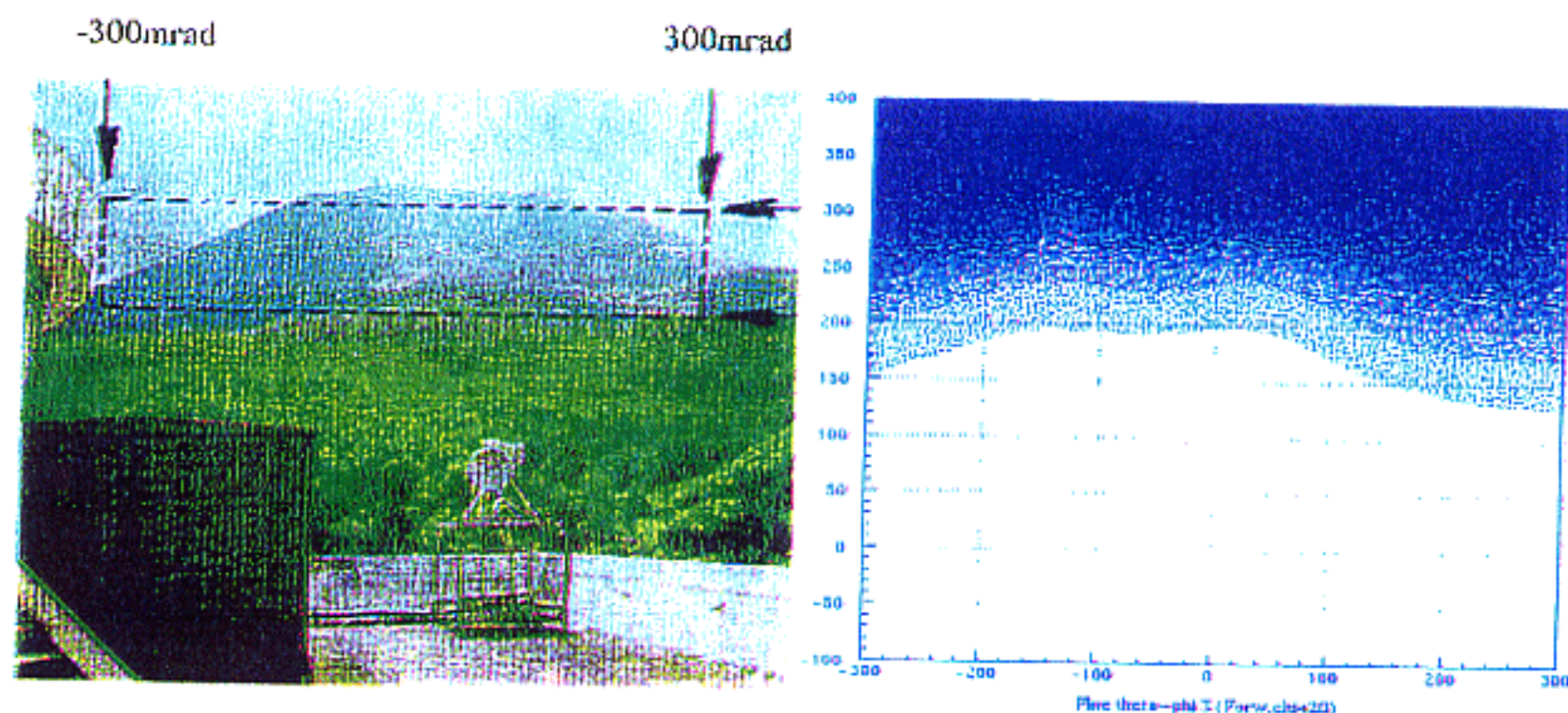
ミュオンの加速器及び蓄積と 高輝度ニュートリノの発生



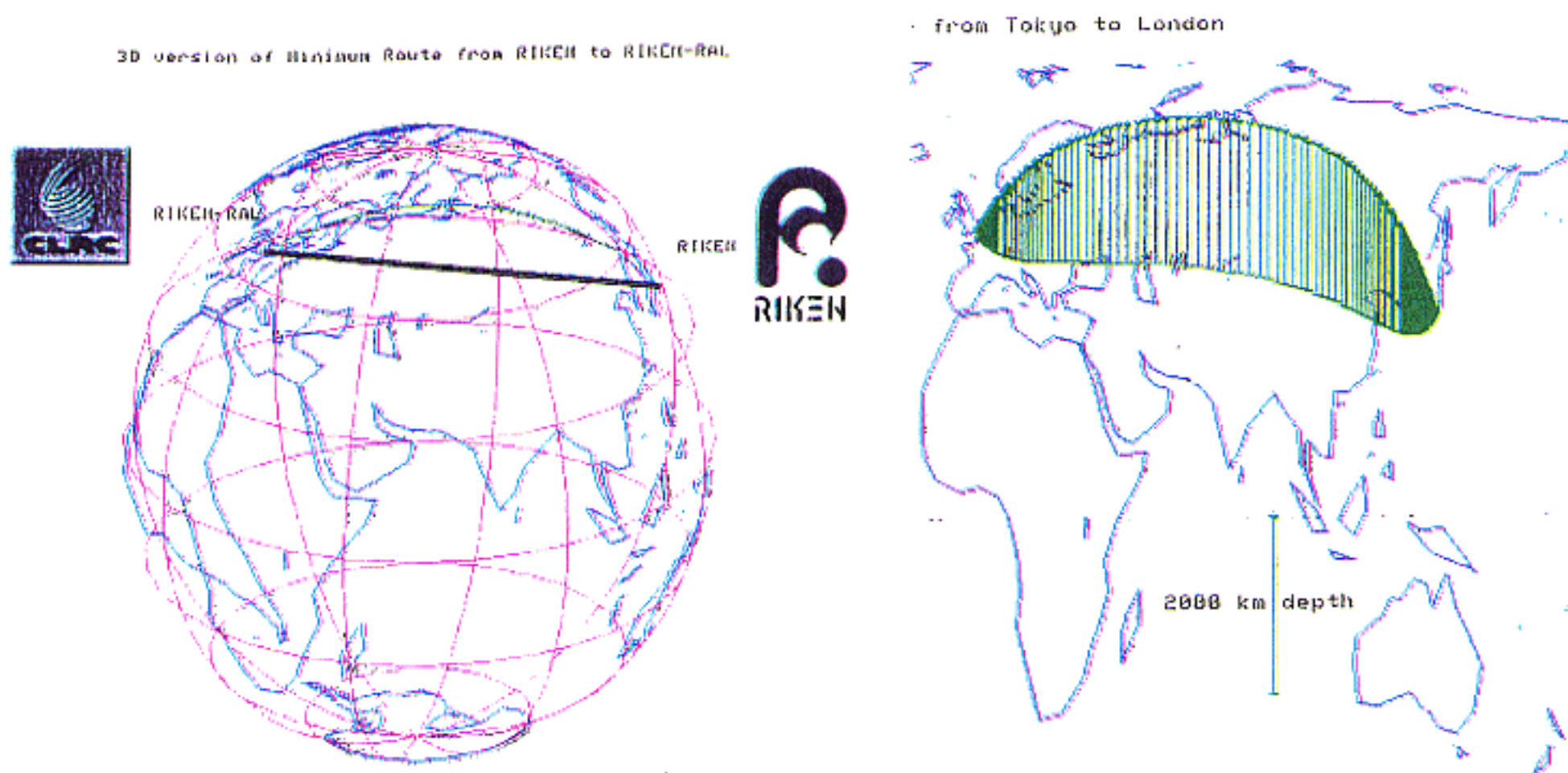
—理研-RAL 第2期計画のさらなる拡張—

宇宙線ミュオンによる火山噴火予知と
高強度・高輝度ニュートリノによる地震予知

宇宙線ミュオン（数 100 GeV）で火山体の内部を探る



高強度・高輝度ニュートリノ（数 TeV）で地殻深部を探る



計画延長への要望

[1] 必要性

- ☆ユーザーとプロポーザルは年々増加しており、発展途上のミュオン科学研究のさらなる発展をはかりたい。
- ☆ミュオン核融合とエネルギー問題、ミュオンによる生命科学研究など、社会的ニーズに直結した研究が展開できる。
- ☆「大強度陽子加速器計画」における「ミュオン科学」研究につながるために、世界最先端の研究が維持されなければならない。

[2] 期待される成果

- ①ミュオン触媒核融合のブレークイーブンを達成する。
- ②大強度超低速正ミュオンの発生と表面科学への利用。継続計画として、大強度高輝度ニュートリノビームを実現する。
- ③大強度のミュオンビームを用いて「蛋白質中の電子伝達」や「生体内器官の微量元素分析」などの、新しい生命科学研究を行う。
- ④ミュオン基礎物理研究による素粒子基本法則の最高精度検証。

1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015

37

KEK中間子施設

KEK陽子シンクロトロン (5 μ A $\times$ 500MeV)
世界初のパルス状ミュオン施設

物性研究

萌芽的開発研究

原子核・素粒子物理

理研RALミュオン施設

ISIS陽子シンクロトロン (200 μ A $\times$ 800MeV)
世界最強のパルス状ミュオン施設

原子核・素粒子物理

ハドロン統合計画

大強度陽子加速器 (330 μ A $\times$ 3GeV)
理研RALをこえるパルス状ミュオン施設

物性・原子核・
素粒子・生命科学研究