55

Publication No.55

第１回　仁科記念シンポジウム「アイソトープ科学の最前線」

# 核物理から核医学まで

中根良平　　矢野安重　　米倉義晴

Nishina Memorial Foundation
公益財団法人　仁科記念財団

第１回仁科記念シンポジウム「アイソトープ科学の最前線」が 2008 年７月に日本アイソトープ協会、理化学研究所仁科加速器研究センター主催、仁科記念財団後援で下記の通り開催された。この仁科記念財団冊子 NKZ-55 はその講演録であるが、その後の成果等も加筆してある。

講師のうち、中根良平先生は 2010 年４月に他界された。また矢野安重氏は 2009 年 10 月より同センター特別顧問、2011 年４月より仁科記念財団常務理事となっている。

2015 年１月　仁科記念財団

**第１回　仁科記念シンポジウム「アイソトープ科学の最前線」**

「核物理から核医学まで」

日時：　2008 年７月１日（金）14：00 ～ 16：30

場所：　新生銀行本店ホール（東京都千代田区内幸町）

講師：　中根良平　理化学研究所名誉相談役、仁科記念財団常務理事

矢野安重　理化学研究所仁科加速器研究センター長

米倉義晴　放射線医学総合研究所理事長

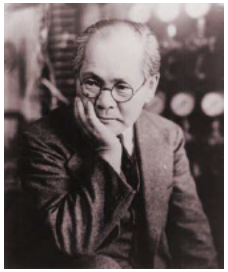
主催：　日本アイソトープ協会

理化学研究所仁科加速器研究センター

後援：　仁科記念財団

NKZ-55
第１回　仁科記念シンポジウム「アイソトープ科学の最前線」
「核物理から核医学まで」

## ABOUT 開催に当たって


仁科芳雄（にしなよしお、1890-1951）

我が国のアイソトープ科学の歴史は理研における仁科芳雄博士のサイクロトロンの建造に端を発しています。以来70年余になる今、RIビームファクトリーが産声をあげ、我が国はアイソトープ科学の歴史にあらたな１ページを書き加えようとしています。このシンポジウムでは仁科芳雄博士のサイクロトロンからRIビームファクトリー、そしてさらには加速器とアイソトープの医学応用までを実際に推進に携わった３人の講師が語ります。

## PROGRAM プログラム

司会：井戸 達雄（日本アイソトープ協会）

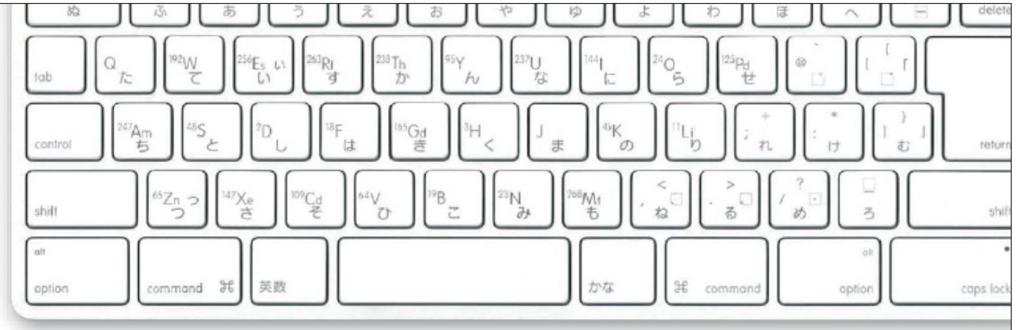
14：00　挨拶
山崎 敏光（仁科記念財団理事長）

14：10　「仁科芳雄博士と我が国初のサイクロトロン」
中根 良平（理化学研究所名誉相談役）

14：55　「RIビームファクトリーの始動」
矢野 安重（理化学研究所仁科加速器研究センター長）

15：40　「分子イメージングによる核医学診断」
米倉義晴（放射線医学総合研究所理事長）

16：25　挨拶
田端 米穂（日本アイソトープ協会副会長）

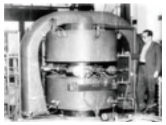



▲アイソトープキーボード
現在発見されているなかで、とりわけ重いアイソトープや歴史的意味合いの強いものを並べてみた。
QとJで始まる元素はまだ発見されていない。

# 仁科記念シンポジウム
# アイソトープ科学の最前線
## ―核物理から核医学まで―

主催：理化学研究所
日本アイソトープ協会
後援：仁科記念財団

## GALLARY ギャラリー

大サイクロトロン（1943年）と仁科研究室の研究者たち。このサイクロトロンは当時世界最大級であったが、戦後米軍によって東京湾に投棄された。

ラジオアイソトープ利用50周年記念切手。小サイクロトロンでの初のRI製造を記念。

1954年当時の理研（駒込）。右上隅の建物は現在の日本アイソトープ協会。

現在の理研（埼玉県和光市）。赤枠の部分がRIビームファクトリー。

理研3号サイクロトロン（1953年）。東京湾に投棄された小サイクロトロンを再建。

理研4号サイクロトロン（1967年、和光市）。日本初の重イオン加速器。

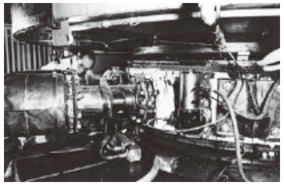
日時
2008年7月1日（火）
14:00～16:30

会場
新生銀行本店ホール
（東京都千代田区内幸町2-1-8）

## LECTURE 1

# 仁科芳雄博士と我が国初のサイクロトロン

有名なクライン・仁科の公式を導いた仁科芳雄は 1937 年“小サイクロトロン”を建設し、速い中性子によるウランの対称核分裂およびウラン 237 を発見した。次いで戦時中、“大サイクロトロン”を建設し、核分裂反応の基礎データを測定したことなどを、新しく発見した資料により紹介する。



▲大サイクロトロンを調整する仁科博士

Presenter
中根 良平　RYOHEI NAKANE

理化学研究所　名誉相談役
仁科記念財団　常務理事

Career

| | | |
|---|---|---|
| 1943 年 | 理化学研究所 | 仁科研究室入所 |
| 1962 年 | 同 | 同位元素研究室主任研究員 |
| 1979 年 | 同 | 理事 |
| 1982 年 | 同 | 副理事長 |
| 1986 年 | 同 | 相談役 |

## LECTURE 2

# RIビームファクトリーの始動

◀史上最強の超伝導リングサイクロトロンの定格励磁成功を祝う仁科加速器研究センタースタッフ

仁科芳雄が理研 1 号の“小サイクロトロン”を完成させてから 70 年余となる今、理研では史上最強の“RI ビームファクトリー”の整備が進行している。昨年 6 月には世界初の超伝導リングサイクロトロン（理研 9 号）でウランイオンを加速し、核分裂によって新同位元素の発見に成功した。世界に冠絶するラジオアイソトープ（RI）生成能力をもつ新施設の建設と今後の展開を紹介する。

Presenter
矢野 安重　YASUSHIGE YANO

理化学研究所
仁科加速器研究センター長

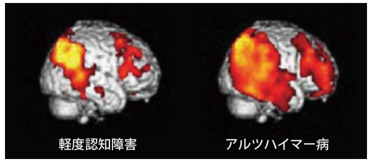
Career

| | | |
|---|---|---|
| 1980 年 | 理化学研究所 | サイクロトロン研究室研究員 |
| 1989 年 | 同 | サイクロトロン研究室副主任研究員 |
| 1991 年 | 同 | サイクロトロン研究室主任研究員 |
| 1999 年 | 同 | 加速器基盤研究部長 |
| 2006 年 | 同 | 仁科加速器研究センター長 |

## LECTURE 3

# 分子イメージングによる核医学診断

放射性同位元素を用いる核医学画像は，機能画像としての特徴がある。遺伝子やタンパク質などさまざまな分子の挙動を画像化する分子イメージングの導入によって，疾患の診断から治療薬開発まで幅広い展開が期待される。




▲アルツハイマー病の早期診断に役立つと期待されている脳内アミロイド蓄積の PET 画像。軽度認知障害（左）の患者で，既にアミロイドの集積が観察される。

Presenter
米倉 義晴　YOSHIHARU YONEKURA

放射線医学総合研究所　理事長

Career

| | | |
|---|---|---|
| 1980 年 | 京都大学医学部 | 核医学科助手 |
| 1990 年 | 同 | 脳病態生理学講座助教授 |
| 1995 年 | 福井医科大学 | 高エネルギー医学研究センター教授 |
| 1998 年 | 同 | 高エネルギー医学研究センター長 |
| 2006 年 | 放射線医学総合研究所 | 理事長 |

司会　時間がまいりましたので、仁科記念シンポジウムを始めさせていただきます。皆様、本日は仁科記念シンポジウムにお運びいただきまして誠に有難うございます、私は本日の司会を務めます、日本アイソトープ協会の井戸でございます。

本日の仁科記念シンポジウムは、理化学研究所、日本アイソトープ協会ならびに仁科記念財団の三者が合同で企画しております。タイトルといたしましては「アイソトープ科学の最前線―核物理から核医学まで―」という題で、今日のシンポジウムを進めさせていただきます。

ご存じのとおり、日本のアイソトープ科学の発展は、仁科芳雄先生が 1937 年に国内で初めてサイクロトロンを完成されたことから始まったと思われます。本日は、仁科先生のサイクロトロンが成功するいきさつと、最近になって仁科先生のいろいろな書簡などが見つかってまいりましが、そのあたりのお話を中根先生から、さらにサイクロトロンの最前線って言いますか、仁科先生のサイクロトロンの延長上にある非常に大きなサイクロトロンを完成されました理研の矢野先生から、ラジオアイソトープ･ビーム･ファクトリー（RI ビームファクトリー）についてお話しを伺います。アイソトープの利用という面で、核医学、特に分子イメージングでどのように使われているかを、米倉先生にお話ししていただくことになっております。

それではまずはじめにご挨拶を、仁科記念財団の理事長をなさっております、山崎先生にお願いいたします。先生、お願いいたします。

## 「開会の挨拶」

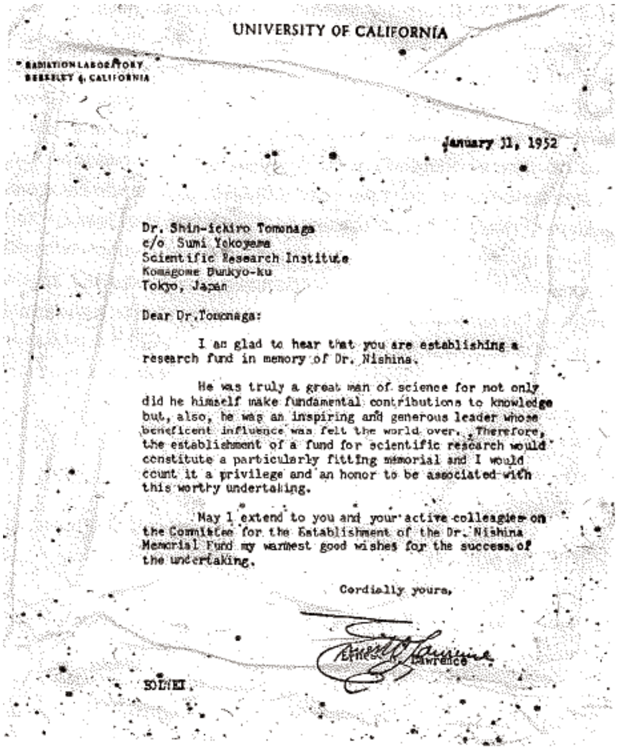
### 山崎 敏光（仁科記念財団理事長*）

皆様、こんにちは。本日は、ようこそお出でくださいました。私、仁科記念財団の理事長を務めております山崎でございます。まずご挨拶の代わりに簡単に、仁科芳雄先生について触れてみたいと思います。

仁科先生は日本の原子物理学の祖と言われ、日本の近代科学の発展のうえで極めて大きな足跡を残されたことはよく知られております。業績といたしましては、湯川中間子―実際はミュー粒子だったのですが―その発見者の一人であるということ。それから、湯川、

---

*2011 年 4 月より仁科記念財団評議員会会長。


UNIVERSITY OF CALIFORNIA

RADIATION LABORATORY
BERKELEY 4, CALIFORNIA

January 11, 1952

Dr. Shin-ichiro Tomonaga
c/o Sumi Yokoyama
Scientific Research Institute
Komagome Bunkyo-ku
Tokyo, Japan

Dear Dr. Tomonaga:

I am glad to hear that you are establishing a research fund in memory of Dr. Nishina.

He was truly a great man of science for not only did he himself make fundamental contributions to knowledge but, also, he was an inspiring and generous leader whose beneficent influence was felt the world over. Therefore, the establishment of a fund for scientific research would constitute a particularly fitting memorial and I would count it a privilege and an honor to be associated with this worthy undertaking.

May I extend to you and your active colleagues on the Committee for the Establishment of the Dr. Nishina Memorial Fund my warmest good wishes for the success of the undertaking.

Cordially yours,

Ernest O. Lawrence

EOL:EI.

Figure 1: Letter of E. O. Lawrence to Sin-itiro Tomonaga in 1952

図 1：E. Lawrence 博士から朝永振一郎博士への手紙

朝永、坂田等々の世界に冠たる日本の素粒子物理学の理論家を育てあげられたこと。そして、サイクロトロンを建設し、それを使って研究をされ、ウラニウム 237 の発見や対称核分裂の発見をなされた―これらはどれも偉大なる発見でございます。さらに先生は理化学研究所を中心に新しい研究の体制をつくられ、この意味でも戦後の科学の発展に大変貢献されました。先生はこのサイクロトロンで放射性同位元素をつくったばかりでなく、戦後、放射性同位元素の利用に関して大変なご貢献をなさいまして、そのお蔭で現在の日本アイソトープ協会もできているわけでございます。

1951 年 1 月 10 日、先生は、大変惜しまれながら 60 歳という若さでお亡くなりになりまして、そのあと、先生のご業績を記念するため仁科記念財団がつくられました。これには、有名なカリフォルニア大学のローレンス E. Lawrence 博士―サイクロトロンの発明者であります―が、仁科先生が亡くなった直後の 51 年の 5 月に日本に来られまして、仁科先生がお亡くなりになったことを、大変悼み、先生の業績を記念する財団をつくったらどうかという手紙を朝永先生に書かれたものが、この図 1 に出ているものでございます。その結果 55 年に、仁科記念財団が創立されました。これは仁科先生を敬愛する世界の学者からのサポートによるものでありまして、外国の多数の著名な学者からたくさんの寄付がありました。その数 44 名。うち、ノーベル賞受賞者になった方が 15 名いらっしゃいます。皆様のポケットマネーの寄付は合わせますと、94 万円何がしかで、当時、これだけ

のお金というのは大変な額でございまして、これが基礎になって、仁科記念財団ができたわけでございます。当財団は設立当初から大変国際的な科学財団であったということがお分かりいただけるかと思います。

記録によりますと、1950 年 4 月に第 2 次世界大戦後初めて、アメリカからラジオアイソトープ（RI）が輸入されます。これが到着いたしまして、その箱を開け、RI を取り出したという、大変歴史的な写真（図 2）がございます。これが始まりで、やがてアイソトープの利用が理化学全体におよぶわけでございます。この中で日本アイソトープ協会ができ、現在までずっと非常に重要な役割を果たしております。そういうわけで、本日、このシンポジウムは理化学研究所、それから日本アイソトープ協会が主催されるということになりました。いかに両者の結びつきが、仁科芳雄先生を通してつくられたかということがお分かりになるかと思います。仁科記念財団はそういう歴史のなかで仁科先生の役割に新しい光を当てながら、進んで行こうと考えております。本日最初にご講演くださる中根先生は、当時のことを―当時っていうのは 1940 年頃ですね―戦争中のことを知っておられる、もう日本で唯一の方でございまして、最近刊行されました『仁科芳雄往復書簡集』等、これまで知られていなかった記録、文献に基づきまして、大変貴重なお話が聞けるものと思っております。このようにして仁科先生の始められたアイソトープの科学は大発展して、現在に至っておりまして、このシンポジウムはその第一線のお話しも伺えるまたとない機会ではないかと思っております。そんなわけで、このあとの三人の方のお話を大変楽しみにしているところでございます。

アメリカから放射性同位体が到着した日の仁科博士とSb-125
（日本アイソトープ協会30年史所載・朝日新聞社撮影）

図 2

# 仁科芳雄往復書簡集

## 現代物理学の開拓 1925–1993

**補巻**

[2011年11月25日刊]

中根良平・仁科雄一郎・仁科浩二郎
矢崎裕二・江沢 洋 編

協力 公益財団法人 仁科記念財団

仁科芳雄発／着の往復書簡を中心に、関連文書を数多く収めた『仁科芳雄往復書簡集』（全3巻、2006–2007）は、20世紀物理学の国内・国外の研究現場の様相を生き生きとかつ多面的に伝える、類のないものとなった。さらに理研の「ニ号」研究や広島・長崎をめぐる調査や考察、米占領下の日本で戦後世界を見据えてゆく数々の書簡・文書は、現代史資料として貴重であるだけでなく、科学者と戦争、国家と時代と科学のあり方を考えるうえで、つねに振り返るべき証拠である。日本科学史学会学会賞特別賞を受けるなど、高評を得ているしだいである。

この補巻は、『書簡集』全3巻刊行後に発見された書簡・文書・資料など490点から成る。シュレディンガーやパウリの講義を聞いた仁科の1920年代のノート、ディラック宛ての書簡にはじまり、宇宙線の研究、対称核分裂、そして「大サイクロトロン日誌」などサイクロトロン建設をめぐる一連の書簡・文書は、当時の日本の科学の最前線を鮮やかに映し出している。

とりわけ補巻の特徴となるのは、日本の原爆開発の一端をしるす仁科芳雄・矢崎為一「核分裂によるエネルギーの利用」（1943）や、「トルーマン声明」など広島・長崎への原爆投下と敗戦前後の「敵性情報」に関する文書、1945年8月9日から1946年3月にいたる「仁科芳雄のノート」などであろう。これらは原爆と「終戦」をめぐる第一級の資料であり、今にいたる原子力問題のあり方の全貌も、ほぼ出揃っている。

「仁科が戦争中から戦後にかけて日本国民に放送や雑誌を通してどう呼びかけていたかもたっぷり収めた。仁科は戦争中にも、いろいろ衣をまぶしながらではあるが、一貫して基礎科学を捨てるなと叫んでいた。Trumanは、広島に原爆を落としたときから原子力の国際管理を言っていたが、仁科も戦後くりかえしてその重要性を言っている」

（江沢 洋「はじめに」より）

**仁科芳雄**（1890–1951）
岡山県生まれ。1917年、東京帝国大学電気工学科を卒業、理化学研究所の研究生となる。1921–28年、ヨーロッパへ留学。1923年からはコペンハーゲンの理論物理学研究所でニールス・ボーアに師事、世界中から集まった俊秀たちと親交する。また「クライン‐仁科の公式」の導出という物理学史に残る成果を上げた。帰国後、ハイゼンベルクとディラックを日本へ招聘。1931年からは理化学研究所を拠点に宇宙線研究、原子物理学の研究を進め、特に大小二つのサイクロトロン建造を主導した。優れた物理学者を多数育て上げ、湯川秀樹・朝永振一郎という二人のノーベル物理学賞受賞者を輩出した。戦中は日本における原爆研究（「ニ号」研究）を率いる。戦後は理化学研究所の存続と国内の科学研究の復興に尽力した。日本学術会議第1期副会長。1946年、文化勲章を受章。学士院会員。

- 『全3巻』刊行後に発見された490点の書簡・文書・論考を収録。
- 日本の原子力研究、広島・長崎や「終戦」前後の資料を多数収める。
- 巻末に中根良平による「現代物理学の父　仁科芳雄」を付す。
- A5判 上製 カバー装・688頁・口絵8頁　定価16800円（税込）
- ISBN 978-4-622-07645-2

＊ 裏面に『仁科芳雄往復書簡集』全3巻のご案内と申込書がございます。

# 仁科芳雄往復書簡集

## 現代物理学の開拓 1919-1951

全3巻

中根良平・仁科雄一郎・仁科浩二郎
矢崎裕二・江沢 洋 編

［初版 2006/07］

協力 公益財団法人 仁科記念財団

仁科芳雄の業績に光を当て、日本における現代物理学の基盤がいかに築かれたかをつぶさに伝える。仁科に連なり国内外で活躍した幾多の物理学者たちの足跡が、書簡という一次資料を通して浮かび上がる。大半が初の公刊となる1421の書簡・文書に注釈を付し、科学と歴史研究の未来へ向け刊行する、昭和の物理学者たちの遺産。日本科学史学会学会賞特別賞受賞作。

**第1巻　コペンハーゲン時代と理化学研究所・初期　1919-1935**

ボーア門下の偉才たちに混じり、仁科が物理学の新開拓分野で業績をあげた時期。世界的な物理学者との人脈が、のちの日本の物理学の発展の生命線となる。

440頁・口絵6頁　定価15750円（税込）　ISBN978-4-622-07261-4

**第2巻　宇宙線・小サイクロトロン・中間子　1936-1939**

サイクロトロン建設の経緯や湯川秀樹の中間子論が生まれる過程の詳細。他に朝永振一郎、坂田昌一など日本の物理学の目覚しい成長の時期を生々と伝える。

496頁・口絵6頁　定価15750円（税込）　ISBN978-4-622-07262-1

**第3巻　大サイクロトロン・ニ号研究・戦後の再出発　1940-1951**

理化学研究所の「ニ号」研究についての資料はじめ、戦後のGHQによる日本のサイクロトロンの破壊、科学研究の復興まで。解説・関連年譜・索引など付。

792頁・口絵6頁　定価18900円（税込）　ISBN978-4-622-07263-8

A5判 上製 カバー装

---

申込書

**仁科芳雄往復書簡集** 全3巻・補巻

補巻＿＿部　第Ⅰ巻＿＿部　第Ⅱ巻＿＿部　第Ⅲ巻＿＿部　申し込みます

□お名前

□ご住所　　　　□電話番号

---

みすず書房　〒113-0033　東京都文京区本郷5-32-21
tel. 03-3814-0131　fax 03-3818-6435　http://www.msz.co.jp

お取り扱い書店

司会　山崎先生、どうも有難うございました。それでは、理化学研究所名誉相談役で仁科記念財団の常務理事の中根良平先生から、仁科芳雄博士と我が国初のサイクロトロンという題でお話をうかがいたいと思います。

## 「仁科芳雄博士と我が国初のサイクロトロン」

中根 良平（理化学研究所名誉相談役、仁科記念財団常務理事）

ご紹介にあずかりました中根でございます。今日は、「仁科芳雄博士と我が国初のサイクロトロン」という題で、仁科先生が最初のサイクロトロンをつくられましたときの話をしたいと思います。実は、10 数年前になりますけれども、あるパーティーで当時の科学技術庁の役人に聞かれましたのが、仁科先生はサイクロトロンをおつくりになったということは非常によく知られておりますけれども、それでいったいどういうお仕事をされたのでしょうか—そういうことを尋ねられたのですね。確かに言われてみますと、先生はサイクロトロンをつくられて、山崎先生がご紹介になりましたような大変すばらしいお仕事をやっておられるのですけれども、それは当時あまり知られていなかったという不思議なところがあります。ただしかし、現在でもあまり知られてないと思いますので、そのことにつきまして、先ほど山崎先生からご紹介ありましたように、最近いろんな古い資料が仁科先生が執務をされていたお部屋【文京区本駒込 2 丁目仁科記念財団内・仁科記念室：文末に当時の理化学研究所の航空写真と建物配置図を示す】から出てまいりしましたので、その資料を用いまして、当時、仁科先生がどれだけすばらしいお仕事をされたかということを、お時間をいただいてご紹介したいと思います。

最初に、先生のご経歴を簡単に申し上げますと、先生は、1890 年に岡山県にお生まれになりまして、それから若いときにご病気されたもので、少し遅れて 1918 年に東京帝国大学工科大学電気工学科を主席で卒業され、それですぐに理研に入られたわけです。1921 年にイギリス Cavendish 研究所のラザフォード E. Rutherford のところに留学されまして、その後ドイツの Göttingen 大学を経て 23 年からデンマーク Copenhagen 大学のボーア N. Bohr のところに移られ、X 線分光等実験研究に研さんを積まれ、さらに理論に転じてコンプトン Compton 散乱をディラック P. Dirac の理論で計算して有名な「クライン O. Klein- 仁科の公式」を導出されました。それが 1928 年です。そしてその年の暮れに、日本に帰って来られました。

| | | |
|---|---|---|
| 1890 | 岡山県浅口郡里庄村に生る | |
| 1918 | 東京帝国大学工科大學電気工学科卒　　理研入所 | |
| 1921 | ラザフォードの下でX線を散乱した反跳電子の方向分布を研究 | |
| 1923 | ボーアの下でX線分光分析を研究 | |
| 1928 | クラインー仁科の公式を導出　　帰国 | |
| 1931 | 主任研究員　　仁科研究室発足 | ユーリー；重水素発見 |
| 1932 | | ローレンス；サイクロトロン発明 |
| | | チャドウィック；中性子発見 |
| 1934 | | ジョリオ・キュリー；人工放射能発見 |
| | | フェルミ；中性子照射により放射性元素を作る |
| 1935 | 仁科、23 トン・マグネットの小サイクロトン製作開始 | |
| 1937 | 小サイクロトロン完成　　210 トン・マグネットの大サイクロトロン製作開始 | |

図 1

当時の核物理の世界と言いますと、1920 年代は理論の時代ですけれども、30 年代に入りまして、ここに（図 1）ちょっと挙げてみたのですけども、実験の時代に入ります。例えば、ユーリー H. Urey が重水素を発見して、チャドウィック J. Chadwick が中性子、それからアンダーソン C. Anderson が陽電子を発見するっていうような、非常に大きな発見が続々と続いたわけです。そして、ローレンス E. Lawrence がサイクロトロンを発明した。1934 年には、ジョリオ・キュリー夫妻 F. & I. Joliot-Curie がアルミニウム Al-27 にアルファ線を当てると放射性のリン P-30 ができることを発見しまして、これが人工放射能の発見となります。

それからすぐに、フェルミ E. Fermi がアルファ線の代わりに中性子を当てると、もっと簡単に人工の放射性元素ができるということを発見しまして、確か 50 種類ぐらい新しい人工放射性元素をつくりました。さらに、フェルミは、天然に存在しますウランに中性子を当てると、ウランよりも重い 93 番元素ができると予言したわけですね。

その予言が非常に有名になりまして、世界中で人工放射能の研究が始まったわけです。仁科先生も、じゃあやってみようとお考えになりまして、最初に研究をするための道具として中性子の発生器をつくろう―そのためにサイクロトロンの建設を考えたわけです。確

か日本無線電信株式会社という会社から23トンのマグネット【無線通信用のパウルセンPoulsen式水素ガスアークarc放電発信器のアーク安定化磁束発生に使用されていたが、当時すでに真空管式になってこの発信器は使用されなくなっていた。ローレンスは部下の技術者から製作費の掛かるこのマグネットをリサイクルする示唆を受けてこれを改造し、1934年磁極直径27インチのサイクロトロンが実現した。仁科博士はこのことを知っていたようである】を２台寄付していただいて、その１台を改造して26インチ・サイクロトロンをおつくりになりました。それが日本でつくられた第１号のサイクロトロンで、我々はこれを小サイクロトロンと言っていますけれども、それが1937年の、確か4月ごろに完成したのですね。そうすると仁科先生は、もうすぐに、大サイクロトロンと我々が言っております第２号のサイクロトロン、マグネットが210トン、だいたい10倍規模のサイクロトロンをつくろうと考えられまして、ただちに、60インチの大サイクロトロンの建設を始められたわけです。【ローレンスの好意で彼の60インチ・サイクロトロンと同じ規模の鉄をアメリカに発注。輸入後は石川島播磨造船所が電磁石を製作した】

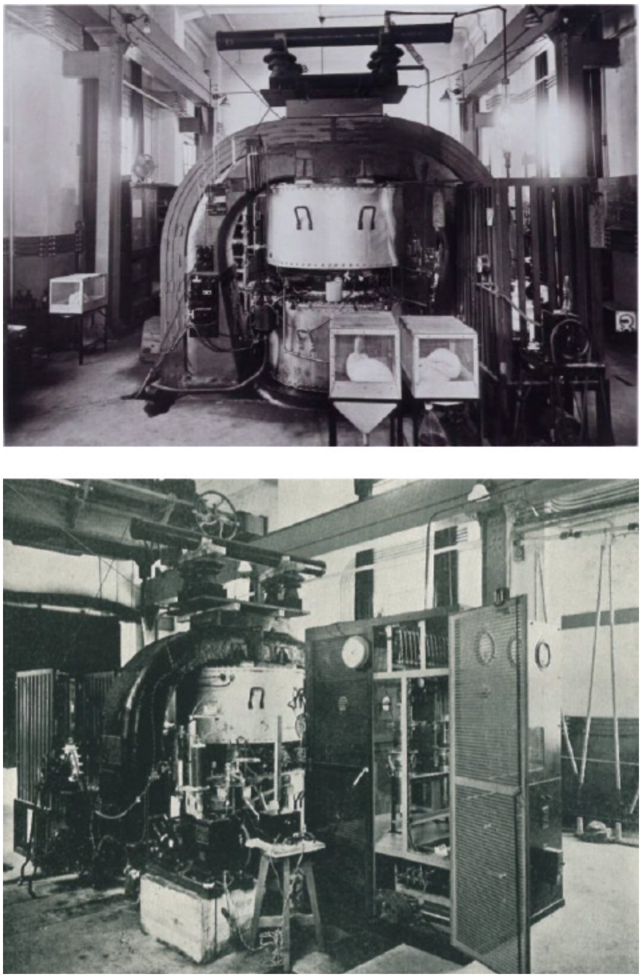


図２：26インチ・小サイクロトロン　下写真には発信器が写っている。

最初につくられました第１号のサイクロトロン、小サイクロトロンはこういうものです

**小サイクロトロンによる生物学の研究**

(1)　トレーサーの研究

| | | | |
|---|---|---|---|
| (a) | $^{23}Na + d \longrightarrow {}^{24}Na$ | $^{24}Na$ をゼラニウムに吸収させて新陳代謝を調べる | 中山弘美 |
| (b) | | $^{24}Na$ を鼠に与えて生理作用を調べる | 森　信胤 |
| (c) | $^{31}P + d \longrightarrow {}^{32}P$ | $^{32}P$ の水草（カナダモ、ヒツジグサ）による吸収と移動 | 中山弘美 |
| (d) | $^{10}B + d \longrightarrow {}^{11}C$ | オオムギを使用しての光合成の研究 | 中山弘美 |
| (e) | $^{12}C + d \longrightarrow {}^{13}N$ | アゾトバクターによる窒素固定の研究 | 久保秀雄 |

(2)　放射線生物学の研究　　$Be + d \longrightarrow n$

| | | |
|---|---|---|
| (a) | ハツカネズミに対する中性子の作用 | 中泉正德・村地孝一 |
| (b) | ソバ、アサ、ソラマメ、アオミドロに対する中性子の作用 | 篠遠喜人・佐藤重平 |
| (c) | ショウジョウバエによる中性子とX線の遺伝的影響の比較 | 森脇大五郎 |

図3

(図2)。ウサギが映っておりますけれども、放射線がだいぶ漏れていたらしくて、その検査のためだという話を聞いています。

そして、この小サイクロトロンができるとただちに、先生は生物学の研究を始められたわけです（図3)。その生物学の研究といたしましては、トレーサー Tracer の研究と放射線生物学の研究と2つおやりになりました。トレーサーの研究としましては、まず、デュウテロン deuteron（d：重陽子）を小サイクロトロンで3MeV まで加速しまして、それを天然のナトリウム Na-23 に当て、中性子を移行させる（d, p）反応で放射性ナトリウム Na-24 をつくりまして、これをすぐに例えばゼラニウムに吸収させて新陳代謝を調べるとか、あるいはネズミに与えて生理作用を調べるというようなことで、トレーサー研究をやられました。それから次に放射性のリン P-32 をつくって、これを水草に吸収させ水草中でのリン元素のトレーサー研究もやられました。戦時中には、放射性の炭素 C-11、窒素 N-13 を陽子を移行させる（d, n）反応でつくりまして、それで光合成、あるいは窒素固定の研究をおやりになりました。

これがトレーサー研究なのですが。次に放射線生物学と言いますと、やはりこの d を、今度はベリリウム Be に照射して中性子のビームをつくって、この中性子を例えばハツカ

速い中性子による人工放射能の研究

仁科芳雄、木村健二郎、矢崎為一、井川正雄、江副博彦

$\mathrm{Li} + \mathrm{d} \longrightarrow \mathrm{n}$ （fast neutron）

(1) 1938； $^{232}\mathrm{Th} + \mathrm{n} \longrightarrow {}^{231}\mathrm{Th} \longrightarrow {}^{231}\mathrm{Pa}$

トリウム系列（4n）の核種 $^{232}\mathrm{Th}$ がアクチニウム系列（4n+3）の核種 $^{231}\mathrm{Th}$ へ転換した最初の例として知られる

(2) 1939； $^{235}_{92}\mathrm{U} + \mathrm{n} \longrightarrow {}_{44}\mathrm{Ru},\ {}_{45}\mathrm{Rd},\ {}_{46}\mathrm{Pd},\ {}_{47}\mathrm{Ag},\ {}_{48}\mathrm{Cd},\ {}_{49}\mathrm{In},\ {}_{50}\mathrm{Sn}$

対称核分裂の発見

(3) 1940； $^{238}_{92}\mathrm{U} + \mathrm{n} \longrightarrow {}^{237}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow 93?$

$^{237}_{92}\mathrm{U}$ は天然に存在しないネプツニウム系列（4n+1）の、人工的に作られた始めての核種である。$^{237}_{92}\mathrm{U}$ は半減期 6.5 日で $\beta$ 線を放射して 93 番元素になるが、分離に失敗した。

図 4

ネズミとかソバですけども、そういう動植物に当てられて、中性子の作用を研究されたわけですね。それからショウジョウバエで、中性子とエックス線の遺伝的影響を比較されて（Y. Nishina, D. Moriwaki, *Sci. Papers of the I.P.C.R*, **36**, 419（1939））、確かエックス線の方が大きいという結果を出されたと思うのですけど、ちょっと忘れましたけれども、いずれにいたしましても、この小サイクロトロンによりまして、放射線生物学の研究を始められた—だから、日本における放射線生物学というのは、この小サイクロトロンで仁科先生がおやりになったのが最初なのです。

そうして、それと平行しまして、速い中性子による人工放射能の研究（図 4）を東大の教授と理研の主任研究員を併任されておりました木村健二郎先生と共同でおやりになりました。この中性子の研究は非常に特殊でございます。リチウム Li に d を当てられて、それで発生する中性子をそのままお使いになったわけです。これがなぜ特徴的かと言いますと、当時、フェルミにしましても、ジョリオ・キュリー夫妻にしましても、それからオットー・ハーン O. Hahn にしましても、皆、中性子を出して、それをまずパラフィンとか、水、水素化合物に当てて散乱させて、それによってスローダウン slow down させて遅い中性子をつくりまして、エネルギーの小さい中性子をつくって、それで研究をしていたわ

けです。なぜ、そうしたかと言いますと、遅い中性子の方が核反応率がオーダーが違うぐらいよかったわけです。そのために彼らはみな、そういう遅い中性子を使って研究をしたんですけれども、仁科先生は、あえて効率の悪い、速い中性子をそのままお使いになった。これが非常に特徴的な発見につながります。

まずおやりになったのは、1938年にトリウムTh-232に速い中性子を照射すると、Th-231ができることを見つけられたんです。Th-231というのは、自然界では、ウランの235がアルファ崩壊して、アルファ線を出してできるわけですね。ところが仁科先生は、自然界にあるトリウムTh-232に速い中性子を当てて、それで中性子をたたき出す（n,2n）反応で人工的にこういうのをつくられたということで、これが発表されたときに非常に有名になったそうです（Y. Nishina, T. Yasaki, K. Kimura, M. Ikawa, *Nature*, **142**, 874（1938）；**144**, 547（1939））。

1938年というのは核物理では非常に有名な年で、この年の暮れにドイツのオットー・ハーンが遅い中性子をウランに当てるとバリウムBaができた―要するに核分裂が発見されます。さらにその翌年、遅い中性子を当てるとウランの中で中性子の数が増倍する現象【核分裂片のほかに複数個の高速中性子が放出される】がフェルミとシラードL.Szilardによって発見されます。そうすると核分裂の連鎖反応が起こって、巨大なエネルギーが産み出せるということが分かって大騒ぎになりまして、特に英米を中心にして、核分裂の研究が一斉に行われたわけです。そういう話を先生もお聞きになりまして、しかしやはりウランに速い中性子を当てられたわけですね。そうすると思いがけないことが起こりました。ここには書きませんでしたけれども、ハーンが遅い中性子を当てると、ウランがバリウムBaとクリプトンKr、それからストロンチウムSrとセレンSeというように重い元素と軽い元素にアンバランスに分裂をするわけなんですけれども、仁科先生がこの速い中性子を当てられますと、真っ二つに割れまして、ここに（図4（2））書きましたように、銀Agとかカドミウム Cdとかパラジウム Pdとかこういうような元素が出てきた。もう非常に特徴的な結果を出されたわけなんで、非常に多くの人が驚かれたと思うのです。そういう点で、仁科先生が発見された真っ二つに割れる核分裂をこのように対称（symmetric）核分裂と言います。（Y. Nishina, T. Yasaki, H. Ezoe, K. Kimura, M. Ikawa, *Nature*, **146**, 24（1940）；*Phys. Rev.*, **58**, 660（1940））それから、ハーンが発見したバリウムとクリプトンができるような核分裂を非対称（asymmetric）核分裂とそう名づけたわけですね。

さらに仁科先生達は、速い中性子で照射したウランに含まれる（図4（2）Ru等）核分

裂物質をケミカルに分離して精製されまして、そのあとに残っているウランに（図4(3)）放射性ウラン U-237 が採れています。この放射性ウランはベータ線を出すんですね。なぜベータ線が出るのか—それで仁科先生は、（対称）核分裂したのはウラン U-235 であって、ベータ線を出すウランは、ウラン U-238 から（n, 2n）反応でできたウラン U-237 —そう考えたわけですね（Y. Nishina, T. Yasaki, H. Ezoe, K. Kimura, M. Ikawa, *Phys. Rev.*, **57**, 1182（1940））。ベータ線を出すということは、92 番が 93 番元素（質量数 237）になったということなんです。結局フェルミが予言した 93 番元素ができたということになります。それで、木村先生が、この 93 番元素を化学分離して取り出そうと大いに努力されたんですけれども—後で話しますように化学分離ができなかったため—これは成功しなかったわけです。

一方で、先生は先ほど申しましたように 1937 年から大きなサイクロトロンをつくっておられたわけです。ところが、これがなかなか難しくて—大型になったために加速電圧、真空度に大問題があったということなんですが— 1940 年になりましてもできないんですね。ところがローレンスは本家だけあって 60 インチ・サイクロトロンを 39 年にはもう既に完成してどんどん研究を始めていたわけです。それを聞かれて仁科先生は、やはりもうどうにもしようがないので教えてもらおうと思われて、矢崎為一先生と他 2 名のお弟子さんをローレンスのところに送られるわけです。ところが 3 名がアメリカに向けて出発された直後に、ローレンスから電報が来まして、それはカリフォルニア大学の総長—ローレンスはカリフォルニア大学の教授です—が、サイクロトロンを見せてはいけないという禁止命令を出したというものでした。それで大変困ったことになったんですけれども、矢崎先生たちはアメリカに着かれローレンスのところに向かったんですね。そうすると、あにはからんや、ローレンスは大歓待してくれまして、そして大サイクロトロンを見せてくれるばかりか、非常に細かく教えてくれたわけなんです。それで矢崎先生は大変感激されまして、仁科先生宛にこういう手紙（図5）を出されたわけですね。長文なんですが、それに大切なことが書かれておりますので、重要だと思ったところだけをピックアップしまして(図6)、少しご説明します。

まず 9 月 4 日の手紙（図5）の最初に「幸いにローレンスが、巧く取扱って呉れましたので、昨日、今日すっかり見学出来まして、八分通り目的を達成した」とあります。矢崎先生は、仁科研で作った図面を持って行かれてそれをローレンス達に見せたんですね。そうすると「ローレンス達は、それを見ていろいろ検討してくれて、これは大改造をせねば

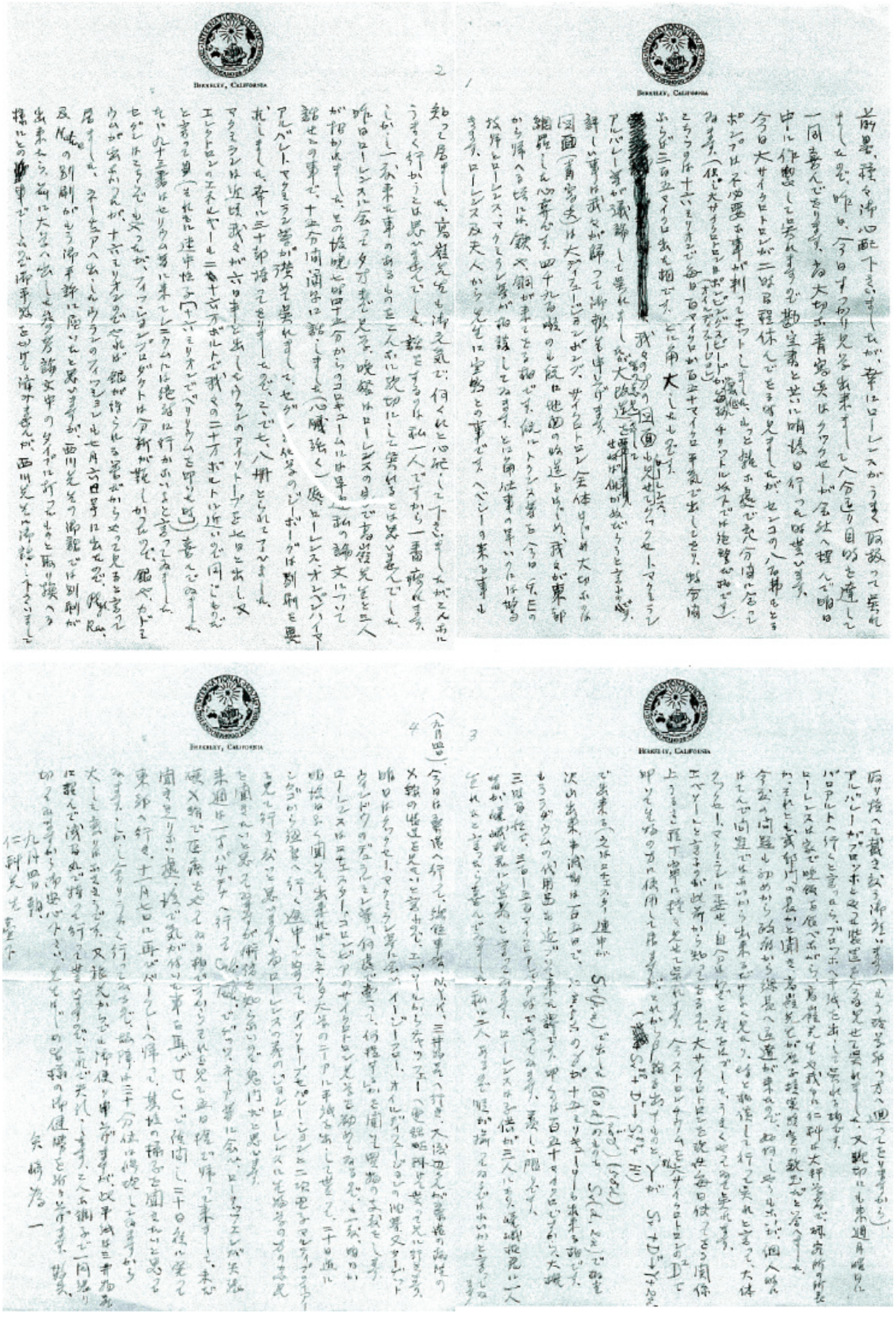


図 5：1940 年 9 月 4 日付の矢崎先生から仁科先生への手紙

矢崎為一———→仁科芳雄　　　　1940/09/04（1）

「ローレンスが巧く取り扱ってくれましたので、今日すっかり見学でき8分通り目的を達して一同喜んでいます。・・・・・我々の方の図面も見せてローレンス、クックセー、マクミラン、アルバレー等が議論してくれましたが、皆の意見が一致して大改造せねば働かぬだろうと言うのです」

「昨日、晩餐はローレンスの家に招かれました。　その後、7時45分からのコロキュウムでは私の論文について話せとのことで、15分間簡単に話しましたが、ローレンス、オッペンハイマー、アルバレー、マクミラン等が褒めてくれ、セグレと化学のシーボルグは別刷りを要求しました。

マクミランは我々が6日半と出したウランのアイソトープを7日と出し、又エレクトロンのエネルギー26万ボルトで我々の20万ボルトと同じだと言って喜んでいました。　ただ93番はセリウム等に来て、レニウム等には絶体に行かないよと言っていました。　セグレはこちらでもやったがフィッションプロダクトは分析が難しかったので、銀やカドミウムが出なかったが、16ミリオンでやれば銀が得られるはずだからやってみると言っていました」

矢崎為一———→仁科芳雄　　　　1940/09/04　(2)

「ローレンスは晩餐を食べながら、今度の問題は始めから政府から総長へ通達が来たので、どうしようもないが、個人的にはてんで問題ないから出来るだけよく見たり、皆と相談してくれと言って、大体クックセーやマクミランに任せ、自分はわざと席をはずして、うまくやってくれています」

1940/09/07

「セグレが盛んに（大サイクロトロンで）16ミリオンのDをベリリウムに当て10グラムのウランを使って我々の結果をチェックしています。3時間半のAgが得られ、Pd（17時間）から得られるのだろうと言っていました。

シーボルグとリビーの要求により化学のセミナーで20分か30分間話すことになっています」

図6

働かない」と言われます。で、そこで教えてもらった改造点を持って矢崎先生は11月に日本に帰って来られ大サイクロトロンの大改造が始まるわけなんです。

向こうの大サイクロトロンを見学した日のローレンス家での晩餐のあとで、ローレンスが矢崎先生に仁科先生がやっておられる速い中性子の話をせよと―そういうことになったわけですね。それで矢崎先生は、その話をされました。ここで（図6）ご覧になって分かりますように、ローレンス、オッペンハイマーJ. R. Oppenheimer、アルバレーL.

Alvarez【1968年ノーベル物理学賞「水素泡箱による素粒子の共鳴状態に関する研究」】、マクミラン E. McMillan【1951年ノーベル化学賞「超ウラン元素の発見」】、セグレ E. Segre【1959年ノーベル物理学賞「反陽子の発見」】、シーボルグ G. Seaborg【1951年ノーベル化学賞「超ウラン元素の発見」】など―ローレンスはもう既にノーベル賞をもらっておりますけれども―マンハッタン計画では一番有名なオッペンハイマーを除いて、あと全員、別々な仕事で戦後ノーベル賞をもらっているんですね。そういうノーベル賞をもらったような人たちのなかで、この話をして、それでなかなかいい仕事だなって誉めてもらったんですね。矢崎先生はもう大変に喜ばれました。

このコロキウムのあとで、「マクミランは93番元素はセリウム Ce 等に来てレニウム Re には絶対に行かないよと言っていました」―後で話しますが、これは非常に重要なことなんです。さらに、「セグレが、こちらでもやったがフィッションプロダクト fission product は分析が難しかったので、銀やカドミウムは出なかったが、60インチ・サイクロトロンの16ミリオン（MeV）でやれば銀が得られるはずだからやってみると言っていました」―ですから、セグレとシーボルグは、速い中性子での核分裂の仕事を同じ頃やっていたことになります。一方、日本では仁科先生と木村先生は、銀とかカドミウムを分析されて、速い中性子では対称核分裂が起きるということをすでに見つけて発表しているわけです。ところが彼らは同じ頃にやりながら、これをまだ見つけていなかった。さらに9月7日の手紙（図6）では、「セグレが大サイクロトロンを使って我々の結果をチェックして、やはり銀が出たと言っている」とあります。それでその年（1940）の終わりごろになって彼ら、セグレ、シーボルグは、対称核分裂を発見したというようなことで、Phys. Rev. 誌に出しているんですね。（E. Segre, G.T. Seaborg, *Phys. Rev.*, **59**, 212（1941））―私もそう思ってたんですけれども、この矢崎先生の2通の手紙を見たら、やはり9月に矢崎先生の話を聞いてから実験をやりながら、あとから自分たちが発見したようなことを書いてるんですね。この辺はちょっと分からないんですけれども。そういうことがございました。

9月4日の手紙に戻りますが、ローレンスが、「今度のサイクロトロンをみせてはいけないという問題は政府から総長へ通達が来たので、どうしようもないが、個人的にはてんで問題ないからできるだけよく見たり、皆と相談してくれと言って、自分はわざと席をはずして、うまくやってくれています」―これはどういうことかということを、少し説明します。これは（図7）、遅い中性子と速い中性子をウランに当てた場合の比較ですけれども、遅い中性子でやると、ウラン U-235 が核分裂をして、このような元素ができます。こ

(1)　遅い中性子

ハーン；　$^{235}_{92}U + n \longrightarrow {}_{56}Ba + {}_{36}Kr, \quad {}_{38}Sr + {}_{54}Xe$　　非対称核分裂

マクミラン；$^{238}_{92}U + n \longrightarrow {}^{239}_{92}U \xrightarrow[23分]{\beta} {}^{239}_{93}Np$

(2)　速い中性子

仁科；　$^{235}_{92}U + n \longrightarrow {}_{44}Ru, {}_{45}Rd, {}_{46}Pd, {}_{47}Ag, {}_{48}Cd, {}_{49}In, {}_{50}Sn$　　対称核分裂

仁科；　$^{238}_{92}U + n \longrightarrow {}^{237}_{92}U \xrightarrow[6.5日]{\beta}$ 93番元素？

図7

れが非対称な核分裂です。ところが仁科先生が速い中性子でおやりになると、このような元素ができて、対称核分裂がおこります。まったく違うことが起こります。それで仁科先生はさらに、トリウムのときと同じようにして（n, 2n）反応でウラン U-238 からウラン U-237 を見つけられた。これはベータ崩壊しますので、93 番元素ができているだろうと思われたんですけれども、これを見つけることができなかった。一方、マクミランは、遅い中性子を当てたんですね。そうしますと、ウラン U-238 が中性子を吸収してウラン U-239 ができた。これもベータ崩壊するんです。半減期も違います。それで彼らは 93 番のネプツニウム Np を発見したんです（E.M. McMillan, *Phys. Rev.*, **58**, 178（1940））。なぜ木村先生は失敗して、マクミラン、結局、アーベルソン P.H. Abelson ですけども、成功したかと言いますと、9 月 4 日の手紙にあるように「93 番はセリウム等にきてレニウムには絶対に行かないよ」が理由なのです。木村先生は、93 番を取ろうと思って、当時の周期律表を見ると、93 番がちょうどレニウムの下の周期の同族になっているんですね。【文末の図 19 は 2014 年の周期表である。当時、ランタノイドはすでに発見されていたが、アクチノイドはまだ発見されていない】だから、ケミカルな性質は似ているだろうと思われて、レニウムの化合物をキャリア Carrier にして分離しようとされたんです。ところが駄目だった。実際は、後にシーボルグ等によって発見されるのですが、93 番元素というのは、いわゆるアクチニウム Ac からはじまるアクチノイドの性質を持っているわけですね。アクチニウム Ac、トリウム Th、プロトアクチニウム Pa、ウラン U と。この次に 93 番が来る。化学的な性質はウランに似て、希土類元素の系列です。そうしてもう 1 つ上の周期

の同族の希土類元素がランタノイド。ランタン La から始まる系列。マクミラン達は、そのなかのセリウム Ce みたいなものをキャリアにしたんですね。そうすると両方とも希土類元素の性質を持っていますから、うまい具合にキャリアと一緒に沈殿したわけですね。分離できたわけです。それで 93 番元素を発見して（1940 年 5 月）ネプツニウム（Neptunium）と名前をつけた（1942 年 Plutonium と共に命名）。それで彼らはフェルミが予言した、遅い中性子でのウランより重い元素の発見という例をやってのけたわけです。木村先生は「残念だった」といつもおっしゃっていたということをお話ししておきます。【仁科先生と木村先生が 93 番元素の発見に至らなかった話は NKZ No.52「仁科芳雄博士の輝かしき業績」の中の「ウラン -237 と対称核分裂の発見」池田長生も参照されたい】

ここで当時の状況を申しますと、いま話をしています 1940 年の前の年の 39 年 9 月にドイツは、ポーランドに侵攻して第 2 次大戦が始まります。そのときアインシュタイン A. Einstein は、ドイツが原爆をつくるだろうからアメリカでもつくるべきであるという有名な手紙をルーズベルト F. Roosevelt 大統領宛に出すわけですね。ルーズベルトはすぐにウラン諮問委員会を作りまして、原爆製造の検討が始まります。翌年 1940 年の 5 月、超ウラン元素（ウランより重い元素）の核分裂の可能性がターナー L.A. Turner によって提唱されます。つまりネプツニウム Np の次の 94 番元素ですね―プルトニウム Pu ですけれども― 94 番元素を作れば、これは中性子を当てると、ウラン 235 と同じように核分裂するんじゃないかというような理論的な予想がでてくるわけです。そのときにちょうど、マクミラン達がローレンスのサイクロトロンを使って 93 番元素を発見したので、政府からローレンスにサイクロトロンを使って中性子を当てて 94 番元素を作って、ほんとに理論どおり核分裂するかどうかを調べてくれという要請があったんです。それがこのローレンスが言っております政府からの通達なんですね。ちょうどそういうときに、仁科先生は大サイクロトロンの作り方を教えてほしいと言って、矢崎先生を派遣されたわけです。総長はサイクロトロンっていうのは、原爆開発では非常に重要な機器になっていると認識しています。アメリカはまだ中立を守っていましたけれども、ドイツは敵である。そのドイツと日本は同盟関係を結ぼうとしている【1940 年 9 月 27 日締結】。そういう日本人にサイクロトロンを見せるのは困るといって禁止命令を出すわけです。しかし、ローレンス自身にしてみると、彼は今まで核分裂というのは、非対称核分裂だけだと思っていたわけなんですが、仁科先生が対称核分裂ということを発表されたので、対称核分裂に非常に興味を持ってその話を聞きたい。データは出されただけで簡単ですから、もっと詳しく聞きたいと

いうことがあって、そうしたらちょうどそのときに矢崎先生が来られたんで詳しい話を聞こうということになったらしいんですね。それで聞いて、それは大変面白い。非常にいい仕事だと言って、彼は誉めたということになります。さて、となりますとローレンス自身は、総長の言うこと、つまり命令をきかなかったわけですから、彼自身は管理職という立場を忘れてしまっていることになってしまうので、それで、あとはマクミランに任せて自分は話を聞いて席を立ったというような対応をとってくれた―そういうことなんです。核分裂するのは遅い中性子での非対称ばかりと思っていたのは、ローレンスだけじゃなくて、ほかの人たちも皆、そうだったんですね。ところが仁科先生は対称核分裂を発見されたので、彼らは非常にびっくりしたと言うんですか、関心を持ちました。

矢崎先生は、バークレーのあとプリンストンとかロチェスターとかボストンとかいろんなところに行かれるんですけれども、そこでフェルミに会われると、今度はフェルミも速い中性子の仕事は非常にいい仕事だと誉めてくれたんだそうです。そして、シカゴでシンポジウムがあって、そのときに晩餐会でフェルミが挨拶したんだそうですけど、そのときのスピーチで―この手紙（図 8）にありますように―仁科がやった仕事は大変いい、自分

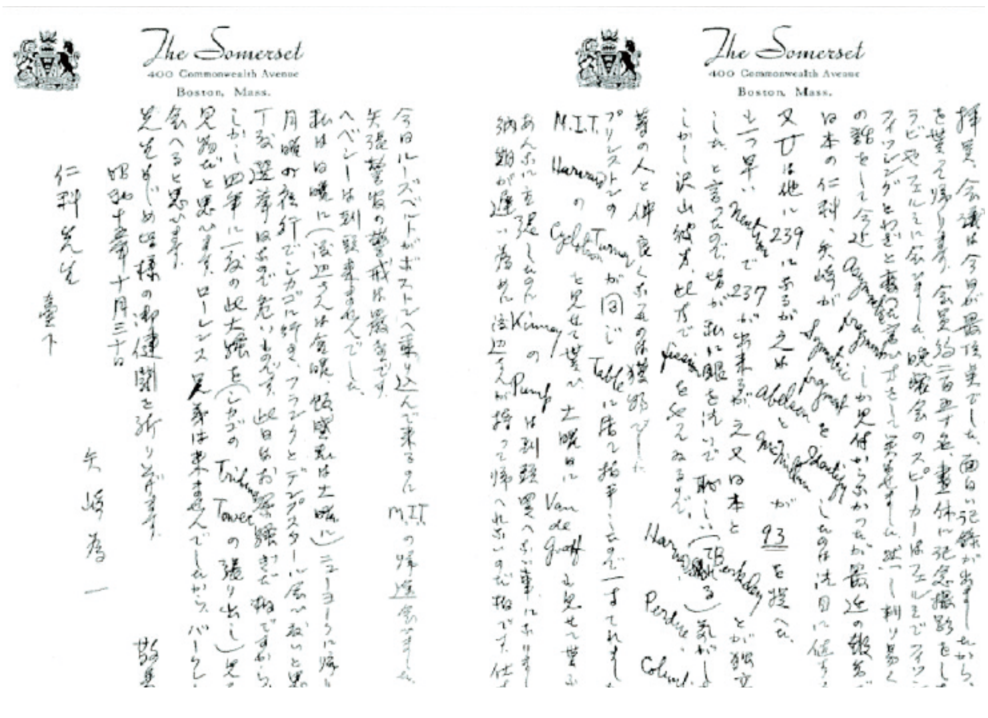


図 8：1940 年 10 月 30 日の矢崎先生から仁科先生への手紙

図９：改造前の大サイクロトロン　土門拳の文化人写真集「風貌」に載った科学者仁科芳雄博士の写真　湯川秀樹博士の写真もある。添え書きに昭和十四年（1939年）とある。

は、Asymmetricな核分裂しか知らなかったのに、仁科先生はSymmetricな核分裂を発見した。そしてウランU-237も発見した。これは注目に値すると。そういうようなこと言ったんで矢崎先生は照れて下を向いたと。それでまた、ターナーですね。超ウラン元素の核分裂を理論的に予言したターナーが拍手したんで、大変照れてしまったということを、嬉しそうに書いています。そういうふうに、フェルミとかローレンスとかの超一流の人たちから、仁科先生の対称核分裂が激賞されたわけなんですけれども、不思議なことに日本ではほとんど知られてない。なぜだろうかと、

| | |
|---|---|
| 1941/01 | 長岡半太郎、商工省総務局および鉄工局に「大サイクロトロン改造用金属材料配給」申請 |
| /04 | 陸軍航空技術研究所長（安田武雄中将）原爆研究を仁科芳雄に依頼 |
| 1942/03 | 大サイクロトロン青写真制作 |
| /12 | 仁科芳雄、SOS（渦巻型）電磁分離法によるウラン濃縮を検討 |
| 1943/01 | 玉木英彦、核分裂反応の臨界値を「ウラン235濃度10%、10Kg」と計算する |
| | 仁科芳雄、熱拡散法によるウラン濃縮の採用を決定 |
| /05 | 陸軍航空本部、仁科芳雄に「二号研究」を依嘱 |
| 1943/12 | 大サイクロトン、始めてビームを出す |

図10

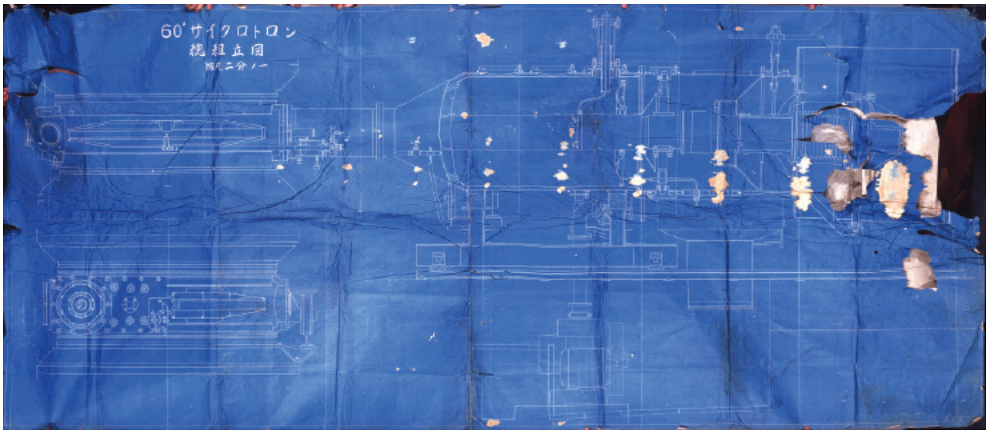



図 11：60"サイクロトロン 総組立図　縮尺二分ノ一　磁極間に設置される加速箱の側面図。上図右方に同軸型空洞共振器が見える。

非常に不思議なんですけど—そういうことがあります【1941 年 1 月シーボルグとセグレは 60 インチ・サイクロトロンを使ってウランより放出中性子数とエネルギーの大きいプルトニウム Pu-239 を発見】。

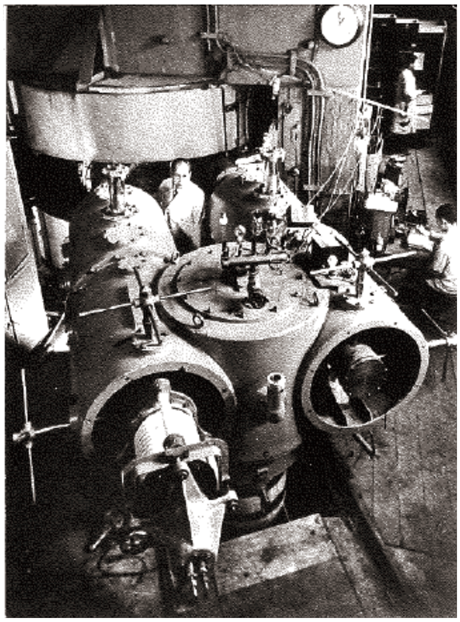


図 12：完成した大サイクロトロン

矢崎先生、日本に帰ってみえて、仁科先生にローレンス達の指摘を報告されますなり、仁科先生はすぐに大改造をされます【図 9 と図 18 は改造前の大サイクロトロンの写真】。大改造っていうのは、マグネットだけを除いた、あとのもの全部を【特に、高い加速電圧を発生できる空洞共振器への構造変更—旧設計ではこれが決定的な欠陥であると指摘された：初期のサイクロトロンの磁場分布では、粒子の回転周期が粒子のエネルギーによらず一定（等時性と呼ぶ）というサイクロトロン加速の原理を満たしておらず、粒子の回転周期が加速高周波電場の周期に対して常に遅れるようになっていた（図 18 参照）。加速電圧が低いと

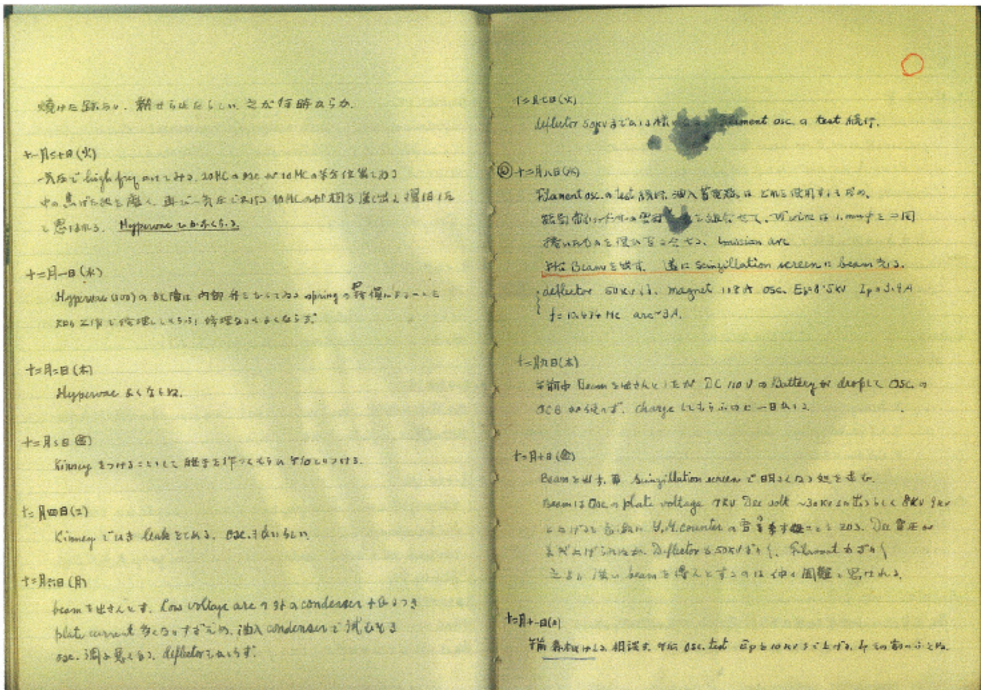


図 13

回転数が増え周期のずれが大きくなって遂には高周波電場の減速位相に入って、それ以上加速できなくなる。そのため高い電圧が必要であった。小サイクロトロンでは簡単な LC 回路で発生する低電圧でも目的のエネルギーまで加速できたが、大サイクロトロンでは加速の途中で減速位相に入ってしまった。ローレンス達はこの限界に気づき、高い加速電圧を発生できる空洞共振器と呼ぶ立体 LC 回路を使った。高エネルギーになると相対論的な効果で粒子の質量が加速につれて次第に大きくなるので、位相の遅れはさらに大きくなる】つくり変えることになったわけです。そのためには、鉄だとか銅だとか金属がたくさん要りますけれども、もう戦争が始まる前ですから、それが配給制になるんです。それで長岡半太郎先生、仁科先生をずいぶんバックアップされております、長岡半太郎先生が、仁科先生が大サイクロトロンを改造するから、金属を配給してくれという申請を出されるんです（図 10）。ところが、戦争がいよいよ始まりますから、なかなか材料が集まらなかったらしいんですね。結局、戦争が始まって、その次の年、1942 年の 3 月になって、やっと大サイクロトロンの青写真をつくられました。だから、このときからつくり始めたのだと思います。このようなボロボロの青写真（図 11）が残っております。

「二号研究」

| | | |
|---|---|---|
| (1) | 六フッ化ウランの熱拡散によるウラン 235 の濃縮（ウラン濃縮） | 玉木英彦 |
| | | 竹内　柾 |
| | | 木越邦彦 |
| (2) | ウランの探索と酸化ウランの製造 | 飯盛里安 |
| | | 畑　　晋 |
| | | 長島乙吉 |
| (3) | 重量 210 トンの大サイクロトロンの製作および核分裂反応の基礎データの測定 | |
| (a) | 中性子によるウラン存在比の測定 | 山崎文男 |
| (b) | 遅い中性子によるウラン 235 分裂の研究 | 新間啓三 |
| (c) | ウランによる遅い中性子の吸収の研究 | 杉本朝雄 |
| (d) | 非均質系におけるウランによる遅い中性子の捕獲の研究 | 田島英三 |

図 14

これは大サイクロトロンが完成したときの写真（図 12）です。真ん中に仁科先生がおられます。【先生の両側は同軸型空洞共振器。2 本の共振器の間にある円筒は理研の工作部で製作したと思われる油拡散ポンプ。粗引きポンプに矢崎先生がアメリカで購入したキニー Kinney の油回転真空ポンプ（図 8 の手紙に記述がある）を使用している：真空度が悪いと加速粒子は残留分子との衝突で失われる。消失率は加速器の中を走る距離に対して指数関数で増えるのでより高いエネルギーに加速するにはより高い真空度が必要となる】

実は、最近、まさに先月こういう 2 冊の大サイクロトロンの実験日誌（図 13）を財団で見つけたんです。その一番はじめは 1942 年の 7 月 2 日で、それからいろんなものをチューニングするのに非常に時間がかかり、1943 年の 2 月 10 日、組み立て終了記念って書いてあります。ですから、ほとんど半年以上かかって、部品を集めて組み立てられた。そうしまして、12 月 8 日「午后 beam を出す。遂に Scintillation Screen に beam 光る」と。さらに日誌では翌 44 年 2 月初めてサイクロトロンからビームを取り出すことに成功したことを「二月十五日午后、window の外に白い beam の出るのを認める。Dee voltage を上げると益々明るくなる」と書いてあります。青写真をつくられてから、2 年ですね。そ

戦時研究実施計画（技術院）　　整理番号 37-1　　昭和 19 年 2 月 2 日

担当　陸軍省　陸軍航空本部技術部（軍事機密）　　担当官　小山航技中佐

協力　海軍省

主任研究員　　仁科芳雄

研究課題　　放射性元素ニ関スル研究

（1）重量 210 噸ノ電磁石ヲ有スル「サイクロトロン」ヲ用ヒテ強力ナル放射性元素ヲ生成ス

仁科芳雄、山崎文男、新間啓三、杉本朝雄

（2）右ノ放射性元素ヲ利用スル、応用研究ヲ行ナフ

矢崎為一、玉木英彦、竹内　柾、木越邦彦

資材　　鋼　3.5 噸、銑　3.3 噸、銅　150 噸等

資金　　計 33,550 円

図 15（1）

れぐらい掛かってやっと完成。戦争中ですから、大変に苦労をされたと思うんです。こういう実験日誌を見つけたんです。これを見て非常にびっくりしました。私なんかにとっては、もう宝の山みたいなものです。

ちょっと元に戻りますけれども、ニ号研究（図 14）。大サイクロトロン改造中の 1943 年の 5 月に陸軍航空本部から、ニ号研究が委嘱されたわけです。これが普通に言われる原爆研究です。そのなかで、(3) のところに、この大サイクロトロンの製作がニ号研究に組み込まれているんですね。そして核分裂反応の基礎データを取るとなっています。こうして現在進行中の大サイクロトロンの建設が、このニ号研究の目的の 1 つになったわけです。

これはほんとにみなさんご存じないんですけれども、こういう事情がありましたのですね。この実験日誌を読んでいて、あれあれと思ったんですけれど、9 月 14 日に、午後、仁科先生よりサイクロトロンの目的、方針について話あり―そういう書いてあるんですね。私の想像では、5 月にニ号研究をお受けになって、しかし 9 月になってから初めて皆にニ号研究の目的をお話しになったのではないかと思うんです。というのは、この 9 月に、もう 1 つの経緯があると思うんです。(1) の熱拡散によるウラン U-235 の濃縮。この研究のために熱拡散塔っていうのをつくることになって、9 月からその建設が始まっているわけです。これでこのサイクロトロもできるし熱拡散塔も 1944 年にはできるっていうので、

「ニ号」特別研究班編成表

| 企画班 | 掛 | 業務 | 担任者 | 場所 |
|---|---|---|---|---|
| 企画班 | 企画掛 | 研究進捗ニ関スル全般的 | | |
| 有森大佐 | | 企画並ニ班外トノ連携 | 小山少佐 | 航本 |
| 研究班 | 理論計算掛 | 物理的理論計算 | 玉木英彦、福田信之 | 理研 |
| 仁科芳雄 | 物理掛 | 基本恒数ノ決定 | 新間啓三、杉本朝雄、田島英三 | 理研 |
| | 第一分離掛 | 熱拡散ニヨル | | |
| | | 同位元素ノ分離 | 竹内　柾、佐治中尉、橘高少尉 | |
| | | | 林少尉、坂田民雄 | 理研 |
| | 第二分離掛 | 同 | 鈴木少佐、紀本中尉、尾崎誠之助 | 阪大 |
| | 第一検出掛 | 分離度ノ測定 | 山崎文男、木下中尉、中根中尉 | 理研 |
| | | | 生本高弘 | |
| | 第二検出掛 | 同 | 浅田常三郎、奥田毅、緒方惟一 | 阪大 |
| | 化学掛 | 化学反応及精製 | 石渡中尉。木越邦彦、関原中尉、 | |
| | | | 鱒淵中尉、川村少尉、船津少尉 | 理研 |
| 原料班 | 原料掛 | 資源探査及原料ヨリ | | |
| 飯盛里安 | | ウラン酸化物ノ製造 | 畑晋、中根中尉、長島乙吉 | 理研 |

図 15（2）

1944 年はずいぶん研究をされようとしたと思います。大サイクロトロンからビーム取り出しに成功した 1944 年の 2 月には、「ニ号研究」が、ここにありますように技術院の戦時研究実施計画（図 15）に—軍事機密となっていますね—「放射性元素に関する研究」として認可されています。しかしながら研究ではあまり成果が上らないうちに 1945 年になりまして—4 月 13 日、14 日ですね—東京大空襲で小サイクロトロンと熱拡散塔が焼けてしまいました。それで、6 月にニ号研究は中止。大サイクロトロンは、幸い無事だったんですけれども、研究は全部ストップした段階で、8 月に日本は戦争に負けてしまいました。

（図 16）そうして 9 月になりまして、GHQ から、カール・コンプトン（K.T. Compton）

| | |
|---|---|
| 1945/04 | 米軍の空襲により、小サイクロトロン、熱拡散塔焼失。 |
| /06 | 「二号研究」中止 |
| /09 | カール・コンプトンが仁科研究室を調査、次のような報告を GHQ に行なった。 |
| | 「仁科研究室では熱拡散實験が行なわれたが、結果が得られる前に施設が破壊された。 日本人は計算を誤って爆発の条件は達成されないとの結論を導いたので、原子爆弾の製造は研究されず、考えられもしなかった。 研究の目的は石炭に替わるものとして原子力の利用法を發見することにあった」。 そして「U235 を大量分離する研究を行なわないという規制のもとに研究を許可すること」と結論している。 |
| /10 | このコンプトン勧告を受け、GHQ は大サイクロトロン稼動を許可した。 その覚書は「生物学や医学の分野においてのみ放射性物質や中性子の研究を行なうこと」と記している。 |
| /11 | 米陸軍マンハッタン計画司令官グローブス少将の許可を得たとして、ブリット少佐が「日本のサイクロトロン破壊を GHQ に命令するよう」米陸軍省に要請した。 |
| | GHQ、大サイクロトロンを破壊し、東京湾に廃棄。 |
| 1945/12 | パターソン陸軍長官、サイクロトロン破壊は陸軍省内での過失によると謝罪。 |
| 1947/04 | 農林省の委託により重窒素 N15 の分離研究開始。　杉本朝雄、江副博彦、中根良平 |
| 1950/04 | 10%N15 濃縮。 東大農学部三井研究室においてトレーサー實験に使用。 |
| | 米国原子炉製の Sb125 が仁科芳雄に贈与され、東大理学部木村研究室においてトレーサー實験等に利用される。 |
| 1951/01 | 仁科芳雄没 |
| /05 | ローレンス来日。 23 トン・マグネットの小サイクロトロン建設を勧告。 |
| 1952/10 | 第三号小サイクロトロン完成。　山崎文男、新間啓三、杉本朝雄、田島英三 |
| | 短寿命 RI 頒布。 |
| 1956/08 | 99・9%N15 分離成功。 農業技術研究所、農事試験場等でトレーサー實験に利用される。 |

図 16

― MIT の学長ですが、あの有名なコンプトン効果でノーベル物理学賞を受賞した A. Compton の兄ですけれども―が科学技術調査団というのを引きつれまして、理研の仁科研究室に来て調べまして、挙句のはてに、こういう報告を GHQ に出すんです。「熱拡散の実験をおこなった施設が破壊された。それから次に日本人は計算を誤って爆発の条件は

達成されないとの結論を導いており、原子爆弾の製造は研究されず、考えられもしなかった。研究の目的は石炭に替わるものとして原子力の利用法を発見することにあった」という、原爆開発とは別の目的だったという結論になっているわけです。私は的確な報告だと思うんですけど、なぜこういうことを彼らは書いたのかと言いますと、要するにニ号研究で核分裂反応の基礎データを取るというときに、仁科先生は「遅い中性子で取る」としていたわけですね。だから、これは「原子力」なんですね。「原子爆弾」というのは、「速い中性子」なんですね—皮肉なことに仁科先生が発見された速い中性子による核分裂が原子爆弾なんですね。ところがどういうことか、ニ号研究では遅い中性子をテーマにされた—そういうことで「日本人は計算を間違った」と言ったんじゃないかと思うんです。分かりませんけれども、要するにそのために原子爆弾の製造は考えもしなかったという結論になっています。事実、仁科先生は核分裂の反応の利用は原子力の方がいいんだということを絶えずおっしゃっておりました。そうして遅い中性子では原子爆弾はできないということも、先生はご存じだったんですけれども、なぜ、遅い中性子を選ばれたのかは、今のところ分かりません。そういうことで、コンプトンは大サイクロトロンを使って研究してもいいという勧告をするわけです。その勧告を受けまして、GHQ はサイクロトロンの稼動を許可しまして、ただし、生物学と医学だけはしてもよろしいという許可を出しました。ところが、11 月に入りまして、米国のマンハッタン計画（原爆製造計画）のブリットという少佐が陸軍省に行きまして、グローヴス准将の許可を得たので日本のサイクロトロンを潰せという指令を GHQ に出せという要請をしたわけです。その要請を受けて GHQ は、パターソン陸軍長官の命令だと言って、大サイクロトロンを破壊して東京湾に捨てちゃうわけですね。それで、もうアメリカの科学界がそれを聞いて大騒ぎになり、なんという野蛮な行為だって大変な騒ぎになりまして、特にカール・コンプトンなんかは激怒しまして、ブリットという少佐を、これを罷免しろと、陸軍長官に要求した。それでもう大騒ぎ、結局、パターソンは、自分はサイクロトンを破壊しろという命令は知らなかったと釈明して、陸軍省による、結局、ブリットが独走してそうなったのだと言って謝ったわけです。一方、マンハッタン計画のグローヴスは、困ったんでしょうけれども、自分はそういう命令を出した覚えはない、自分の言っていることを誤解したんだろうっていうようなことを言って誤魔化した。真相は分かりませんけれども、そういうような弁解をした。いずれにしても、弁解しただけで、もうことは終わってしまったわけなんです。仁科先生はもう、あれほど情熱を込めてつくられたサイクロトロンが東京湾に捨てられて（図 17)、非常にがっくり


図 17：1945 年 12 月 24 日発行の「LIFE」誌に掲載された理研サイクロトロン解体東京湾投棄の記事　左写真：GI ENGINEER USES ACETYLENE TORCH TO DISMANTLE LARGER OF DR. NISHINA'S TWO CYCLOTRONS. MACHINE WAS PARTITIONED TO FACILITATE DUMPING AT SEA. "CYCLOTRON SMASHING American soldiers demolish and sink precious Jap scientific equipment" Last month American soldiers , acting on orders from above, hacked a path with bulldozers to the doors of the Nishina Laboratory in Tokyo's Institute of Physical and Chemical Research and dismantled two of Japan's five atom-smashing cyclotrons. Dr. Nishina, whose larger cyclotron above was partly U.S.-built, had been working under strict supervision on medical and biological research. His apparatus could not have been used to make and atomic bomb. Despite this, parts of the dismantled 200-ton cyclotron were loaded on two Army cargo ships and dumped in Tokyo Bay. Meanwhile in Kyoto and Osaka other GIs descended upon and destroyed Japan's three other cyclotrons. U.S. scientists were enraged. The Association of Oak Ridge Scientists called the action a "crime against mankind." For the original order every one blamed the chain of command, which led ultimately to the Secretary of War, who admitted it had come from his office, though not directly from him. It was, he said, a mistake.　右上左：BASE OF CYCLOTRON, which was imbedded in concrete, is defaced by acetylene torch so it cannot be used again. Magnet's huge copper coils were lifted out by cranes.　右上右：PROFESSOR NISHINA PLEADS for his equipment. "This is ten years of my life," he said. "It has nothing to do with bomb." His wife and secretary wept quietly.　右下左：SOLDIERS CAST CYCLOTRON PARTS from Dr. Nishina's laboratory through insitute's grounds in a huge trailer. Men were from Eighth Army engineer battalion.　右下右：IN TOKYO BAY Americans dump section of "gun," one of cyclotron's most essential parts. Pieces were sunk in water 4,000 feet deep so Japs could never retrieve them.

されたと、そういうふうに言われたようです。

しかしさすが仁科先生はすごいと思うんですが、年も明けて 1946 年、もう立ち直られまして、サイクロトロンを潰されて RI ができないので、天然のアイソトープ、N-15 を濃縮して、そしてこれをトレーサー研究に使おうとされます。そのトレーサー研究は、農地試験場とか農林省関係の研究者と協力してやろうといって、農林省から委託研究を受けられるわけです。それで 1950 年になりますと、10% 濃縮の N-15 ができましたので、東大農学部でのトレーサー実験に供されました。そしてほとんど同じころに、先ほど、山崎先生からご紹介がありましたように、アメリカから原子炉で作ったアンチモン Sb-125 が運ばれて来たわけですね。木村研究室ではそれを使ってトレーサー実験がやられました。その翌年 1951 年 1 月、仁科先生は急逝されてしまいました。それから、5 月にローレンスが来て— 1937 年に最初に小サイクロトロンをつくったときに、日本無線電信ですか、そこから確か 2 台マグネットを寄付されたものですから、1 台を小サイクロトロンに使って、1 台をスペアで残してあったんです—それをローレンスは見つけまして、またサイクロトロンをつくれと言います。で結局、元の小サイクロトロンと同じようなサイクロトロンがつくられました。これが第 3 号ですね。しかし、理研が和光に移るときに解体されまして、マグネットだけは、アイソトープ協会の敷地に記念に置いてあります。【高周波加速装置は上野の国立科学博物館に展示されている】

それから一方の N-15 の方は、だいたい 99.9% ぐらい濃縮できたんで、それでやっと当初の仁科先生の目的どおり農業試験場なんかでトレーサーとして利用されたわけです。理研が和光に移るときに N-15 の濃縮の方は民間の会社に委譲されます。これは現在でも動いているようです。

そういうようなことで、仁科先生がサイクロトロンをつくられ、それを使ってアイソトープの科学を日本に植えつけられたわけです。先生が粉骨砕身努力されていたことを、私なんか、昨日のことのように思っているんです。どうも長いあいだ、ご清聴ありがとうございました。

（文中【　】括弧内は編者の注記）

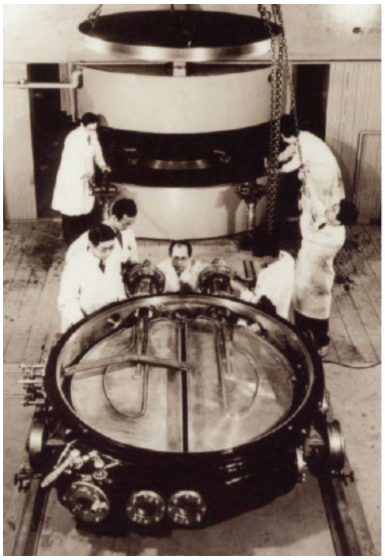
【編者註】

中根良平先生は、2010 年 4 月、岡山県での講演「現代物理学の父 仁科芳雄」を終えて

旅行中急逝された。享年88歳。1943年理化学研究所（仁科研究室）入所、1962年主任研究員、1979年理事、1982年副理事長。1959年「重窒素の同位体分離」の業績で仁科記念賞受賞。

本講演のお話に関連した内容が日本原子力学会誌「アトモス」の「談話室」に中根良平「速い中性子による対称核分裂（その1）—日本の発見と米国の追試」Vol. 51, No.8, 53 (2009)；「速い中性子による対称核分裂（その2）—原爆研究とサイクロトロン」Vol. 51, No.9, 45（2009）として掲載されている。

中根先生が1943年仁科研究室に入所されたとき仁科先生から直接いただいたという「昭和十八年 財團法人 理化學研究所案内」（NKZ No.48「栄光の理化学研究所—その歴史と今後の発展—」中根良平、上坪宏道、丸山瑛一、外村彰、矢野安重の付録参照）に当時の仁科研究室と西川（正治）研究室の室員と研究題目の一覧が記載されている。参考資料としてこの「案内」の両研究室の部分を次頁以下に添付した。両主任研究員は共同で「原子核実験室」をつくり、日本の巨大科学推進の礎を築いた。これによると、矢崎先生は西川研究室の所属である。



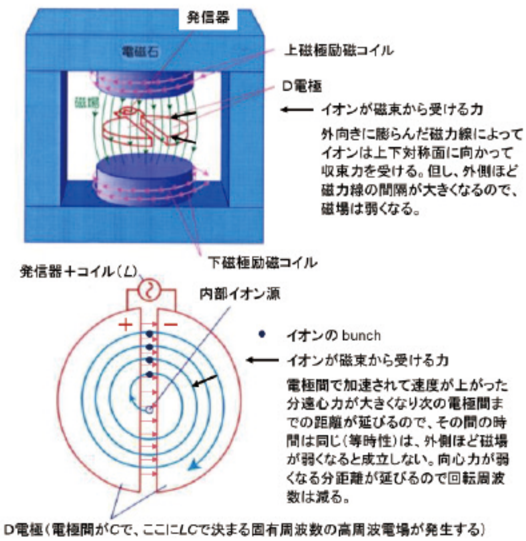



図18：改造前の大サイクロトロンの加速箱（真空箱）を電磁石の磁極間隙から引き出したときに撮った写真とローレンス型サイクロトロンの性能限界　仁科先生の両側の端子に発信器とコイル（$L$）を取り付ける。改造後はこの部分が図12のように同軸型空洞共振器からなる立体回路の $L$ に置きかわっている。

仁科研究室の研究グループは、①宇宙線、原子核並びに中間子の理論②固体の量子論③宇宙線の研究④元素の変換並びに人工放射能の研究⑤大サイクロトロンの建設⑥中性子の研究⑦同位元素の分離⑧サイクロトロンによる高速イオンの分光学的研究⑨原子核物理学の金属学に対する応用⑩人工放射能の生物学に対する応用並びに影響⑪中性子並びに宇宙線の遺伝学的作用⑫中性子の植物に対する作用、となっており、まさに日本の加速器科学の胎動であった。

大サイクロトロンの建設については、日本加速器学会誌の上坪宏道「理研の加速器―1910 年代から現在まで―（その 3）」Vol.3, No.1, 60（2006）に詳述されている。

図 18 左は仁科先生達が改造前の大サイクロトロンの加速箱を電磁石の磁極間隙から引き出したときに撮った有名な写真である。『国際建築』1939 年 5 月号によると、この写真は 1939 年に開催された紐育万国博覧会に壁画写真《躍進日本》の「科学」に国際文化振興会（現在の国際交流基金）が出品したとなっている（筑波大学大学院、中嶋文香氏より）

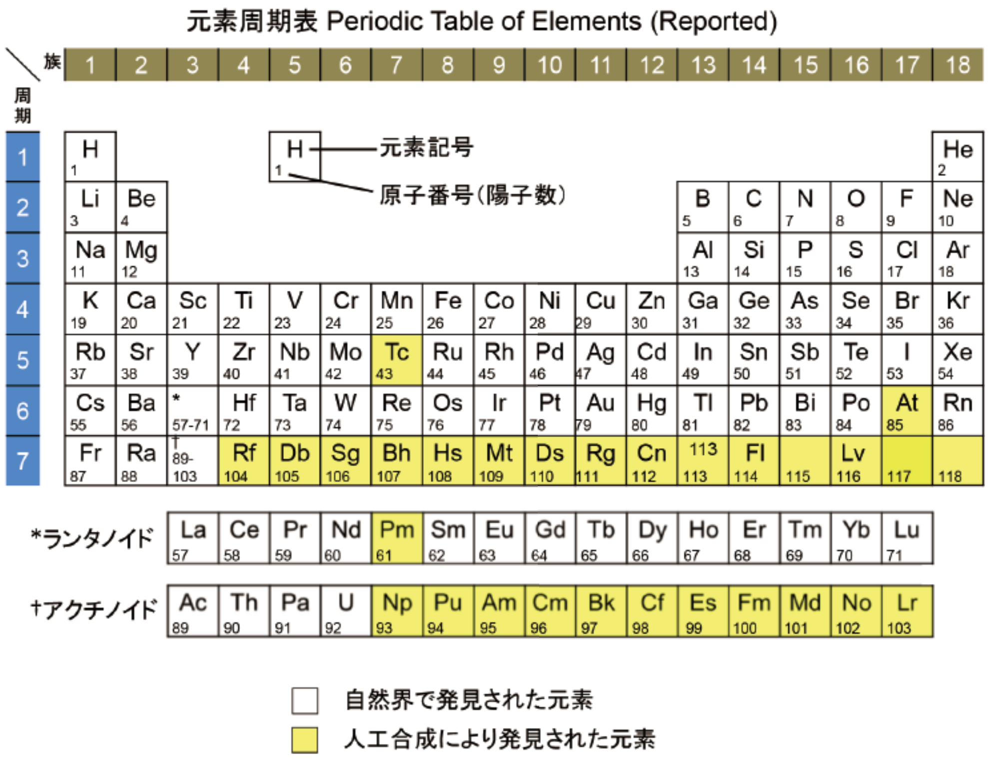
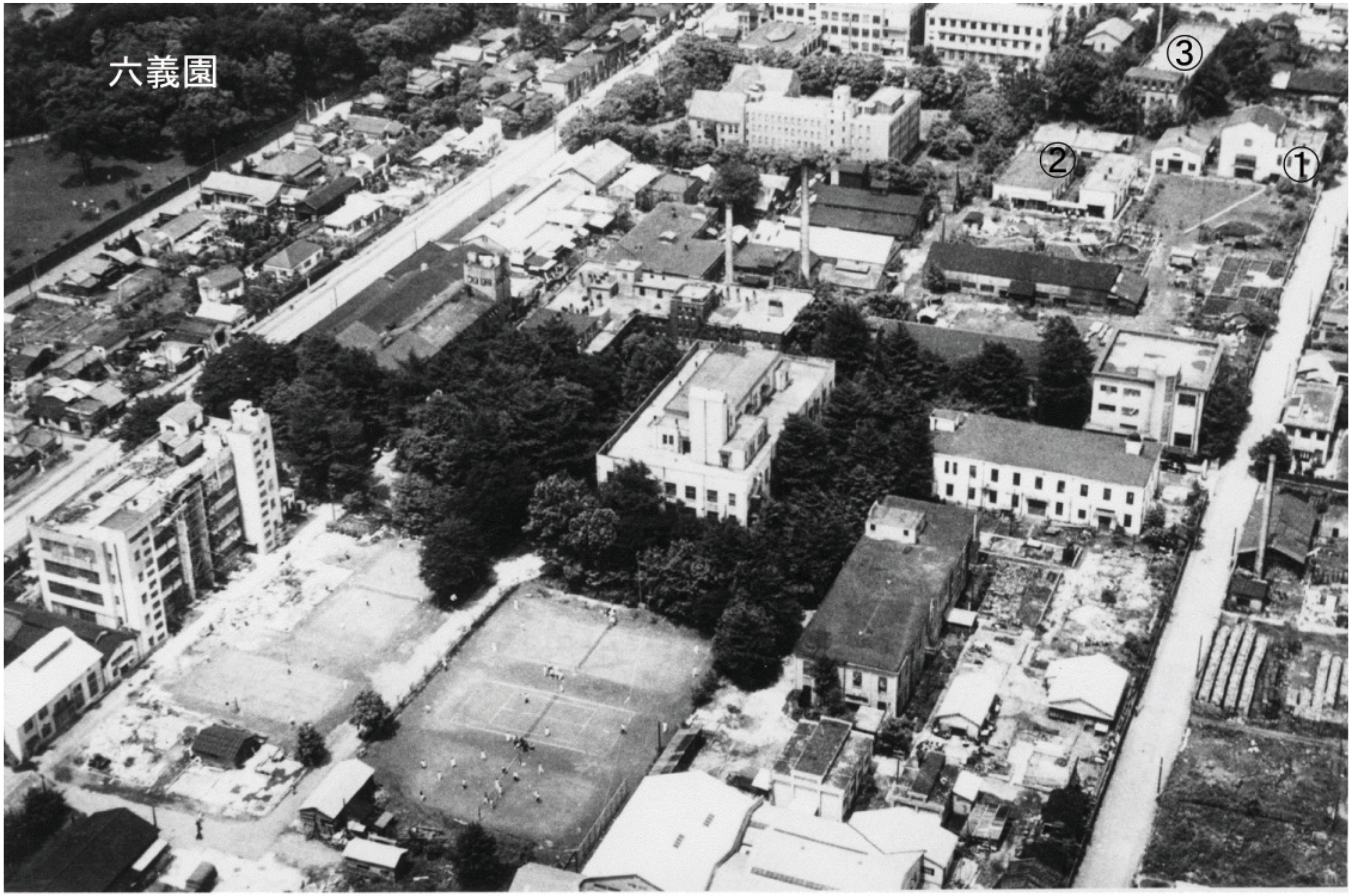
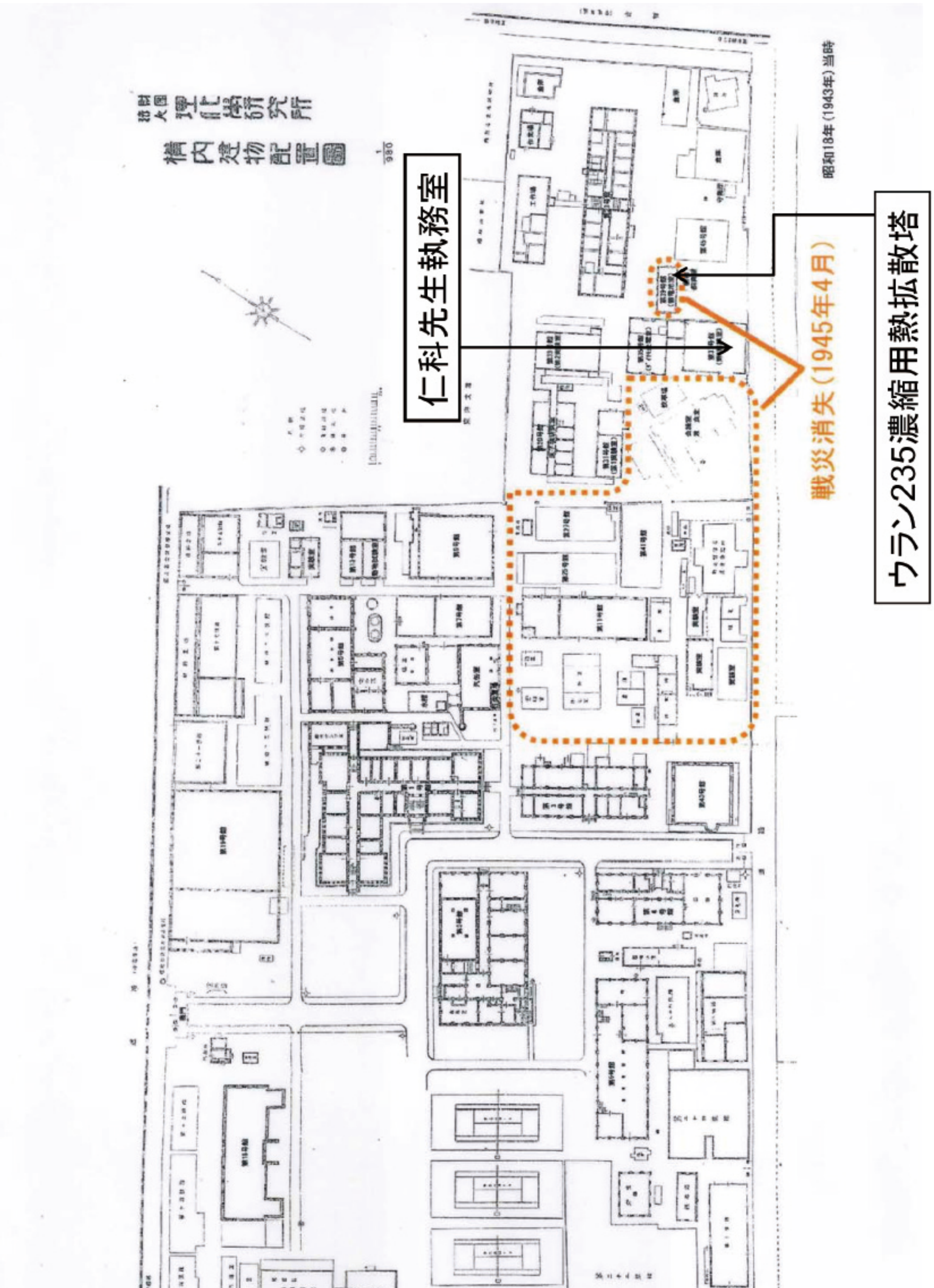



図 19：2014 年の元素の周期表




（財）理化学研究所全景（1954年、撮影：朝日新聞社）①37号館（現在、2階に仁科記念室と仁科記念財団）②サイクロトロン跡 ③23号館（現在、日本アイソトープ協会）


財団法人 理化学研究所
構内建物配置圖
昭和18年（1943年）当時
仁科先生執務室
ウラン235濃縮用熱拡散塔
戦災消失（1945年4月）

昭和十八年

財團法人

# 理化學研究所案内

## 8 西川研究室

一〇九 原子核の研究
- 主任研究員 理學博士 西川正治
- 副研究員 理學士 中川重雄
- 助手 數元伊之助
- 雇員 新井雅巳

一一〇 共鳴中性子の研究
- 主任研究員 理學博士 西川正治
- 副研究員 理學士 木村一治
- 補手 森島純一郎
- 雇員 月川克海

一一一 熱中性子と固體との相互作用の研究
- 副研究員 理學士 木村一治
- 研究生 工學士 橋口隆吉
- 補手 森島純一郎
- 雇員 月川克海

一一二 直流高電壓を使用する原子核の研究
- 主任研究員 理學博士 西川正治
- 副研究員 理學士 鳩山道夫
- 雇員 前山高行

一一三 大サイクロトロンの建設
- 研究員 理學博士 矢崎爲一

一一四 ウランの原子核分裂
- 研究員 理學博士 矢崎爲一

一一五 元素の轉換並に人工放射能の研究
- 研究員 理學博士 矢崎爲一

一一六 原子核の光崩壞に關する研究
- 研究員 理學博士 篠原健一
- 囑託 理學士 岡田利弘

一一七 有機化合物結晶構造の研究
- 研究員 理學博士 仁田勇

一一八 結晶の構造と其の物理的性質との關係
- 研究員 理學博士 仁田勇

一一九 化學結合とX線スペクトルとの關係
- 副研究員 理學博士 吉田早苗

一二〇 長鎖式化合物のX線的研究
- 副研究員 理學博士 吉田早苗
- 助手 理學士 柿內賢信

一二一 固態電媒質の偏極に關する研究
- 主任研究員 理學博士 西川正治
- 助手 理學士 柿內賢信

一二二 X線に依る結晶二次構造の研究
- 主任研究員 理學博士 西川正治
- 囑託 理學博士 向坂義太郎

一二三 X線に依る結晶物理學の研究
- 囑託 理學博士 三宅靜雄

一二四　機械仕上面を表示する單位粗度の研究

囑託　理學博士　福島榮之助

一二五　原子核及素粒子に關する研究

囑託　理學博士　熊谷寛夫

一二六　中性子の生物學的作用の研究

研究員　醫學博士　中泉正德
助手　理學士　村地孝一
囑託　農學博士　木暮槇太
囑託　醫學博士　石原惠三
囑託　醫學士　津屋旭
臨時雇員　木村茂

一二七　人工放射性物質の醫學的應用に關する研究

研究員　醫學博士　中泉正德
助手　理學士　村地孝一
囑託　醫學博士　石原惠三
囑託　醫學士　津屋旭

一二八　人工放射性物質を用いて行ふ生物學上の研究

研究員　醫學博士　中泉正德
助手　理學士　村地孝一
囑託　農學博士　木暮槇太
臨時雇員　木村茂

## 9　仁科研究室

一二九　宇宙線、原子核竝に中間子の理論

主任　理學博士　仁科芳雄
研究員　理學博士　朝永振一郎
研究員　理學博士　湯川秀樹
副研究員　理學士　玉木英彦
助手　理學士　武谷三男
助手　理學士　全平水
囑託　理學博士　梅田魁
囑託　理學博士　荒木源太郎
囑託　理學博士　坂田昌一
囑託　理學博士　渡邊慧

一三〇　固體の量子論

囑託　理學士　小林稔
囑託　理學士　尾崎正治
囑託　理學士　宮島龍興
囑託　理學士　谷川安孝
囑託　理學士　岡山大介
囑託　理學士　井上健
囑託　理學士　中村誠太郎
囑託　理學士　久世寛信
囑託　理學士　釜澤捨男
囑託　理學士　田地隆夫

一三一　宇宙線の研究

主任　理學博士　仁科芳雄
研究員　理學士　石井千尋
副研究員　理學士　關戸彌太郎
副研究員　竹內柾
助手　理學士　島村福太郎
助手　理學士　宮崎友喜雄
助手　工學士　猪木正文
助手　理學士　龜田董
助手　理學士　三浦功
助手　增田時男
副手　菅野常吉
副手　池田輝吉
副手　高野靜夫
副手　木下恰作
副手　沖島先也
副手　立木美枝子
副手　秦さち子
副手　鈴木綾子
副手　木村操子
副手　吉田セキ子
副手　本間潤

| | | |
|---|---|---|
| 補手 | | 室町隆 |
| 補手 | | 志岐治雄 |
| 補手 | | 横山幸雄 |
| 補手 | | 三澤茂人 |
| 補手 | | 石川清一 |
| 補手 | | 池田正雄 |
| 補手 | | 渡邊武次 |
| 補手 | | 寛田光雄 |
| 補手 | | 青木アヤ子 |
| 補手 | | 渡邊光子 |
| 補手 | | 天野嘉子 |

一三二 元素の變換並に人工放射能の研究

一三三 大サイクロトロンの建設

| | | |
|---|---|---|
| 主任研究員 | 理學博士 | 仁科芳雄 |
| 副研究員 | 理學士 | 山崎文男 |
| 副研究員 | 理學士 | 新間啓三 |
| 副研究員 | 理學士 | 杉本朝雄 |
| 副研究員 | 工學士 | 天木敏夫 |
| 助手 | 理學士 | 一宮虎雄 |
| 助手 | 理學士 | 田島英三 |
| 助手 | 理學士 | 水谷寛 |
| 助手 | | 入江辰五郎 |
| 助手 | | 宮川信一 |
| 囑託 | 理學士 | 渡邊扶生 |
| 囑託 | 工學士 | 江副博彦 |
| 囑託 | 理學士 | 宮崎清俊 |
| 副手 | | 白龍房年 |
| 副手 | | 生本高弘 |
| 補手 | | 木村章雄 |
| 補手 | | 齋藤富男 |
| 補手 | | 緒方正 |
| 補手 | | 天野泰明 |
| | | 荒井宗太郎 |
| | | 柴田隆三 |

一三四 中性子の研究

| | | |
|---|---|---|
| 補手 | | 清水良一 |
| 補手 | | 出崎好道 |
| 補手 | | 上野信男 |
| 補手 | | 氏田七治 |
| 補手 | | 伊吹正夫 |
| 補手 | | 神野實 |
| 補手 | | 岡野榮 |
| 補手 | | 清水惣治 |
| 補手 | | 大橋弘高 |
| 補手 | | 西井敏 |
| 補手 | | 稻垣嘉正 |
| 補手 | | 川野辰五 |
| 補手 | | 井川眞砂子 |

一三五 同位元素の分離

| | | |
|---|---|---|
| 主任研究員 | 理學博士 | 仁科芳雄 |
| 副研究員 | | 竹内、柾 |
| 助手 | 理學士 | 木越邦彦 |
| 囑託 | 理學士 | 石渡武彦 |
| 囑託 | 理學士 | 木下利貞 |
| 補手 | | 石渡千枝子 |
| 補手 | | 栗原努 |
| 補手 | | 水間全一 |
| 補手 | | 土田眞 |

一三六 サイクロトロンによる高速イオンの分光學的研究

| | | |
|---|---|---|
| 主任研究員 | 理學博士 | 仁科芳雄 |
| 助手 | 理學士 | 田島英三 |

一三七 原子核物理學の金屬學に對する應用

| | | |
|---|---|---|
| 主任研究員 | 理學博士 | 仁科芳雄 |
| 囑託 | 理學博士 | 仁科存 |
| 囑託 | 理學士 | 橋本一郎 |
| 補手 | | 松原廣一 |

一三八 人工放射能の生物學に對する應用並に影響

主任研究員 理學博士 仁科芳雄
助手 理學士 中山弘美
囑託 醫學士 武見太郎
囑託 醫學博士 森信胤
囑託 理學士 遠藤庄三
囑託 理學士 桑名壽一
囑託 理學士 久保秀雄
補手 中川毅

一三九 中性子並に宇宙線の遺傳學的作用

主任研究員 理學博士 仁科芳雄
囑託 理學博士 森脇大五郎
囑託 農學士 大山一男
補手 宇田川清子

一四〇 中性子の植物に對する作用

主任研究員 理學博士 仁科芳雄
囑託 理學博士 篠遠喜人
囑託 理學博士 佐藤重平
囑託 理學博士 和田文吾
囑託 理學士 田中信德

司会　中根先生、ありがとうございました。実験ノートなど、貴重な資料をお見せいただきまして、大変興味のあるお話でした。それでは続きまして、RI ビームファクトリーの始動ということで、理化学研究所仁科加速器研究センター長の矢野先生にお話をうかがいます。矢野先生はご存じのとおり、世界初の超伝導リングサイクロトロンを完成させられました。それでは矢野先生、よろしくお願いいたします。

## 「RI ビームファクトリーの始動」

### 矢野 安重（理化学研究所仁科加速器研究センター長*）

ただいまご紹介いただきました理研仁科センターの矢野でございます。仁科先生がお亡くなりになった 1951 年ですが、そのとき私はまだ 3 歳でありまして、仁科先生を直接には存じあげておりません。

井戸先生からご紹介のありました RI ビームファクトリー Radioactive Isotope Beam Factory（通称 RIBF）が 2007 年に理研の和光キャンパス（図 1）に完成いたしましたので、この施設の建設のお話をさせていただきたいと思います。RI は Radioactive Isotope 放射性同位元素のことで、RI ビームは文字通り RI が安定なイオンと同じように高速のビームとして利用できるということです。私のお話は簡単に言いますと、「世界に冠絶する」RI ビーム生成能力を誇る重イオン加速器施設が日本で始動したということです。これは世界最高性能のサイクロトロンをつくるという仁科先生の夢のひとつが実現したということになろうかと思います。1980 年代に入って加速器からの粒子ビーム自身（1 次粒子ビーム）を利用していた時代から、電子加速器におけるシンクロトロン放射光、陽子加速器における中性子、中間子、ミューオン、ニュートリノ、反陽子ビームのように 2 次粒子ビームを利用する時代へと大きく移行しつつありました。重イオン加速器における 2 次粒子ビームとして新たに登場したのが RI ビームです。いずれも加速器技術が高度になり高エネルギー・大強度の 1 次粒子ビームが発生できるようになったことが 2 次粒子ビームの実用化を現実のものにしました。

さて、理研仁科センターですが、このセンターは 2006 年 4 月に仁科研究室の伝統を継

---

* 2009 年 10 月より同センター特別顧問。2011 年 4 月仁科記念財団常務理事。本講演録にはシンポジウム（2008 年）での講演に、2014 年までの成果を加筆しました。また故中根良平先生の講演録には私の講演録につながるように編者註を加えました。

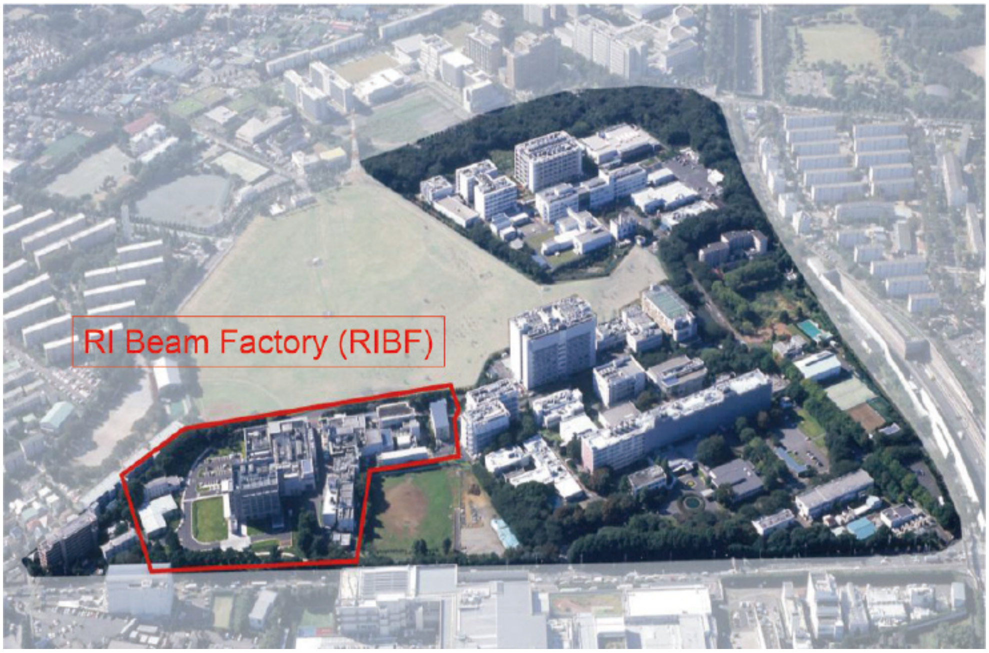



図 1：理研和光キャンパス（1963 年に駒込から移転開始）の航空写真　赤線で囲った地区が RIBF　加速器と実験設備の大半は地下室に収容されている。RIBF の南側（写真では上側）は米軍の AFN ラジオ放送アンテナ用地

承する理研の素粒子・原子核の理論・実験研究グループ、加速器グループ、それに生物や化学への応用研究グループを統合して設立されました。その後宇宙線関連の研究グループも加わりまして、仁科研究室の再来といえるものです。このセンターの設立は私が理事会にお願いしました。Lawrence Barclay Laboratory（LBL）を意識していたのですが、理研の当時の中央研究所から多くの加速器関連の研究室が独立することになるので研究所内の皆さんが納得するのに時間がかかりました。それに加えて理研ではこれまで大先輩の個人名を冠した研究センターはなかったこともあります―おそらく日本でも珍しいと思います。最終的には野依良治理事長のご英断で設立に至りました。

今日は、中根先生のお話にありました仁科サイクロトロンから RIBF の心臓部であります世界初、サイクロトロン史上最強のイオンビーム偏向力 8 Tm、世界最大 8300 トンの超伝導リングサイクロトロンとその関連施設の建設の話をします。仁科先生の大サイクロトロンと同様に、建設はそう簡単ではありませんでしたので、苦節 20 年その格闘の話になります。話の中で RIBF 建設の目的としました原子核の本質の究明と元素の起源の解明

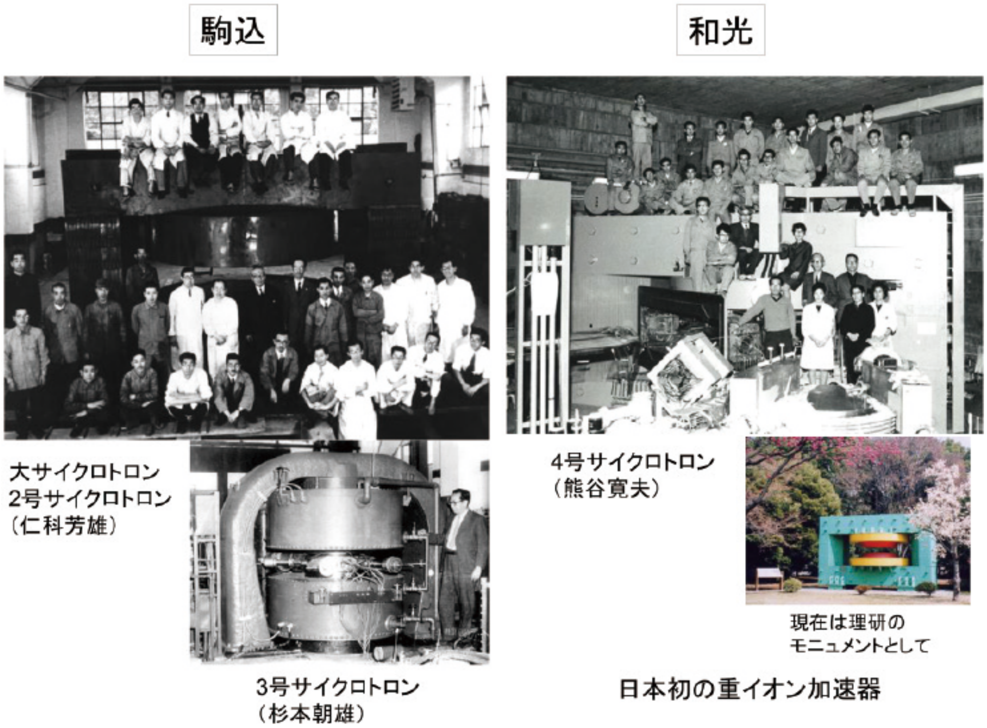



図２：理研２号、３号、４号サイクロトロン

への挑戦に―私は原子核は素人ですので―ごく簡単にふれたいと思います。また話の途中になりますが応用研究にも少しふれてみたいと思います。私たちは米倉先生の放射線医学総合研究所とは 1990 年から重イオンビーム―医療分野では重粒子線と呼びます―による「がん治療法」の共同開発をやってまいりまして、1994 年に日本初の重粒子線がん治療装置 HIMAC（Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba）の治療開始として結実いたしました。そしてこの重イオンビームによるがん細胞の殺傷技術をヒントにしまして、仁科センターの生物照射グループが植物の重イオンビーム品種改良法を開発しました。そのお話をこれも簡単にしたいと思います。要は、中根先生のお話から、米倉先生のお話につながるように、お話をしたいと思います。

仁科先生の後輩の私達は、小サイクロトロンを１号、大サイクロトロンを２号、戦後再建された小サイクロトロンを３号、理研が 1958 年に特殊法人理化学研究所になって和光に移転して、1966 年に完成した 160 cm サイクロトロンを４号としております（図 2)。

図２左上は大サイクロトロンのマグネットが完成した時の記念写真で中央に仁科先生が

立っていまして、右側が長岡半太郎先生、左側が矢崎先生です。この写真が撮影されたのは1937年ですので、中根先生のお話にありました通り、小サイクロトロンが完成したとき大サイクロトロンの建設はここまで進んでいたようです。中根先生のお話のなかにありましたが、ローレンスの示唆で戦後再建された3号の傍らに立っているのは杉本朝雄先生（左上2号の写真では前列右から2番目）です。この3号は1953年に完成ということで、わが国で戦後最初に運転を始めた加速器です。4号は写真中央に腰かけている熊谷寛夫先生（元西川研、初代サイクロトロン研究室主任研究員）が建設されました。これは非等時性で弱収束であった大サイクロトロンの再建といえます。この4号が建設されるころには周回方向変動磁場型サイクロトロン Azimuthally Varying Field（AVF）Cyclotron といって、等時性と強収束の両方を成立させた新式のサイクロトロンが発明されこれが主流になっていました。収束力といっているのはイオンを磁極間中心面に向かって復元する力のことです。AVF では上下の磁極面に扇型鉄片（sector）を3枚貼り付けてイオンが1周する間に磁極間隙が狭くて磁場の強い領域と間隙が広く磁場の弱い領域を交互に3回通過するようになっています。こうすると1周の軌道が円ではなく「おむすび形」になって磁力によるイオン光学でおなじみの「斜め入射」収束力がうまれるというわけです。sector の形状を spiral にしてさらに収束力を強くした AVF が1960年にはアメリカの UCLA で初めて完成しています。しかしながら熊谷先生があえて旧式のサイクロトロンを選択したのは大サイクロトロンを再建して早く世界に追いつきたいという強い願いがあったものと思われます。熊谷先生は新設の東京大学原子核研究所（田無市）で160 cm サイクロトロン—日本初の可変エネルギーのサイクロトロンなのですがこれも非等時性で弱収束—を1957年に完成させたので、その技術をそのまま理研4号に使おうとされたようです。

ただし、4号には現在の RIBF の成功を占う付加価値が付与されました。それは、重いイオンが加速できるようにしたということです—実際フッ素まで加速したようです。4号はわが国初で当時世界でもアメリカの LBL、ソ連の Joint Institute for Nuclear Research（JINR）に並ぶ 重イオン加速器となりまして、1990年まで24年間稼働して現在は RIBF のルーツを顕彰するためモニュメント（図2右下）となっております。

司会をされている井戸先生はこのサイクロトロンを使って陽電子放出核種のフッ素18を作って、これをラベルしたフルオロデオキシグルコース FDG という薬剤を開発されました。今では PET 診断で広く使われています。【NKZ No.54「原子力と仁科博士」の中の井戸先生の講演録「アイソトープの医学利用：Mo-99 問題など」に FDG 開発の苦労話が

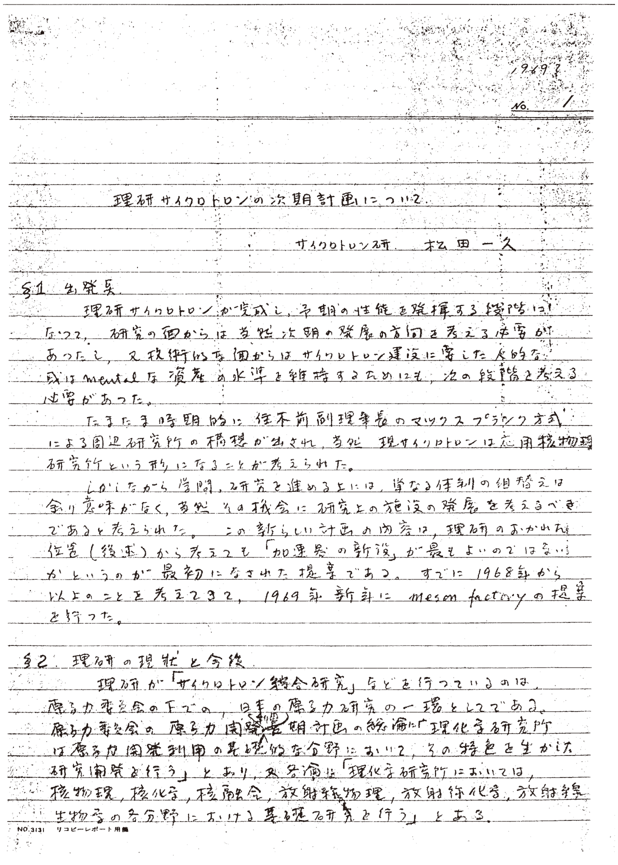
あります】また仁科記念財団理事長の山崎先生も原子核の磁気能率測定の研究をされたそうです。

以来重イオン加速が理研のお家芸となります。重イオン加速の要となる技術は重イオン源です。当時の重イオン源はPIG（Penning Ion Gauge）型といいまして、F. Penningが発明したPIG真空計と同じように静電圧で加速した直流電子流で分子のガスを電離します。真空計では残留ガスを電離してイオン電流から真空度を測りますが、イオン源ではガスを注入してイオン流を取り出します。電離の効率を良くするために磁場をかけて電子を螺旋状に走らせます。当時日本では新しかったこの技術の開発のために先輩がたいへん苦労されたと聞いております。

お家芸の継承ですが、熊谷先生の上の上に立っていらっしゃるのが上坪宏道先生で、次にお話します重イオン線型加速器と５号のリングサイクロトロン、６号のAVFサイクロトロンからなる多段式重イオン加速器施設をわが国で初めて建設されました。私は上坪先生のもとでこの施設の建設に参画し、さらにこれを前段加速器にしたRIBFを完成させました。

ちょっとここでまた過去の話をいたします。熊谷研究室の副主任研究員であった松田一久先生が1969年に書かれた図３のようなメモが残っていまして、後輩の私どもに大変参考になるのでご紹介したいと思います。

タイトルは「理研サイクロトロンの次期計画について」で、§1. 出発点、§2. 理研の現状と今後、§3. Meson



1969.7

No. 1

理研サイクロトロンの次期計画について

サイクロトロン研　松田一久

§1 出発点

理研サイクロトロンが完成し、予期の性能を発揮する段階になって、研究の面からは当然次期の発展の方向を考える必要があったし、又技術的な面からはサイクロトロン建設に要した人的な或はmentalな資産の水準を維持するためにも、次の段階を考える必要があった。

たまたま時期的に住木前副理事長のマックスプランク方式による周辺研究所の構想が出され、当然現サイクロトロンは応用核物理研究所という形になることが考えられた。

しかしながら学問、研究を進める上には、単なる体制の組替えは余り意味がなく、当然その機会に研究上の施設の発展を考えるべきであると考えられた。この新らしい計画の内容は、理研のおかれた位置（後述）から考えても「加速器の新設」が最もよいのではないかというのが最初になされた提案である。すでに1968年から以上のことを考えてきて、1969年新年にmeson factoryの提案を行った。

§2 理研の現状と今後

理研が「サイクロトロン総合研究」などを行っているのは、原子力委員会の下での、日本の原子力研究の一環としてである。原子力委員会の原子力開発利用長期計画の総論に「理化学研究所は原子力開発利用の基礎的な分野において、その特色を生かした研究開発を行う」とあり、又各論には「理化学研究所においては、核物理、核化学、核融合、放射線物理、放射線化学、放射線生物学の各分野における基礎研究を行う」とある。

NO.3131 リコピーレポート用箋

図３：1969年の松田一久先生のメモ

Factory、§4. Cyclotron による私案、§5. 第1段計画、§6. 準備研究という章立てになっています。その中で参考になるところをピックアップしてみます。

§1. まず「又技術的な面からはサイクロトロン建設に要した人的な或いは mental な資産の水準を維持するためにも、次の段階を考える必要があった」—大プロジェクトの運命だと思います。「（略）1969 年新年に meson factory の提案を行った」—4号サイクロトロンが本格稼働したのは 1967 年ですから、その2年後にはもう次期加速器建設計画を提案しています。§2.「理研では原子核・放射線についての基礎から応用までの研究を行うけれども、原子力の開発という観点から見れば基礎的研究をうけもつことになる」—と述べ原子力研究所との違いを強調されます。「（略）加速器を考えるとき（略）AVF サイクロトロン、電子 linac、1 BeV 附近まで陽子を加速する meson factory 及び最近非常に close up されて来たスーパーヘビイの元素生成を目指す重イオン加速器である」—このあと、「仁科先生的な大きな考え方には meson factory が合致するが Los Alamos 計画のコピーにならざるを得ない」とあります。§3.「（略）この提案は、理研隣接の米軍用地の返却問題ともからんで、400 m × 1.2 km の用地要求となっている筈である。しかしながら、研究計画は我々の日常真剣に取り組むべき問題であり、一方米軍用地返却は別次元の問題なので、前者が後者に余り依存することははなはだ好ましくなく、客観情勢によって研究計画が根本的にふりまわされることになる」—図1の航空写真で RIBF の上側に広場が見えますが、これは米軍の AFN（旧 FEN）のアンテナ用地（11 ha）です。東西冷戦中は潜水艦との通信用の長波のアンテナがありました。RIBF 計画立案当初、私もこの用地の利用をもくろみ、実際に「地下構造の RIBF 棟の建設で出る大量の残土を米軍用地の平坦化に使ってもらえないか」という交渉から試みましたが—小林俊一前理事長（元仁科研究室の小林稔先生のご子息）も一緒になって交渉していただきました—結局、松田先生と同じ理由で早々と諦めました。この案件は将来の楽しみにとっておいてあります。このあとの松田先生の案は、1）理研の敷地内で建設 2）リングサイクロトロンへの言及と続きます。§4. ここで複合加速器の構想が示されます。それは Injector →小型 sector cyclotron（陽子 16 MeV）→ sector cyclotron（陽子 150 MeV）→ meson factory（陽子 750 MeV）ですが、重イオン Injector（例えばタンデム加速器）を sector cyclotron（陽子 150 MeV）の前段に加えるとなっています。§5. 第1段計画として、100 kV 入射器→ 2.5 MeV 加速器→ 16 MeV sector cyclotron の提案があります。§6.「この計画に対して重イオンの加速が問題となる。私見ではこの第1段は重イオンを考えない方が人手からも経済的にもよ

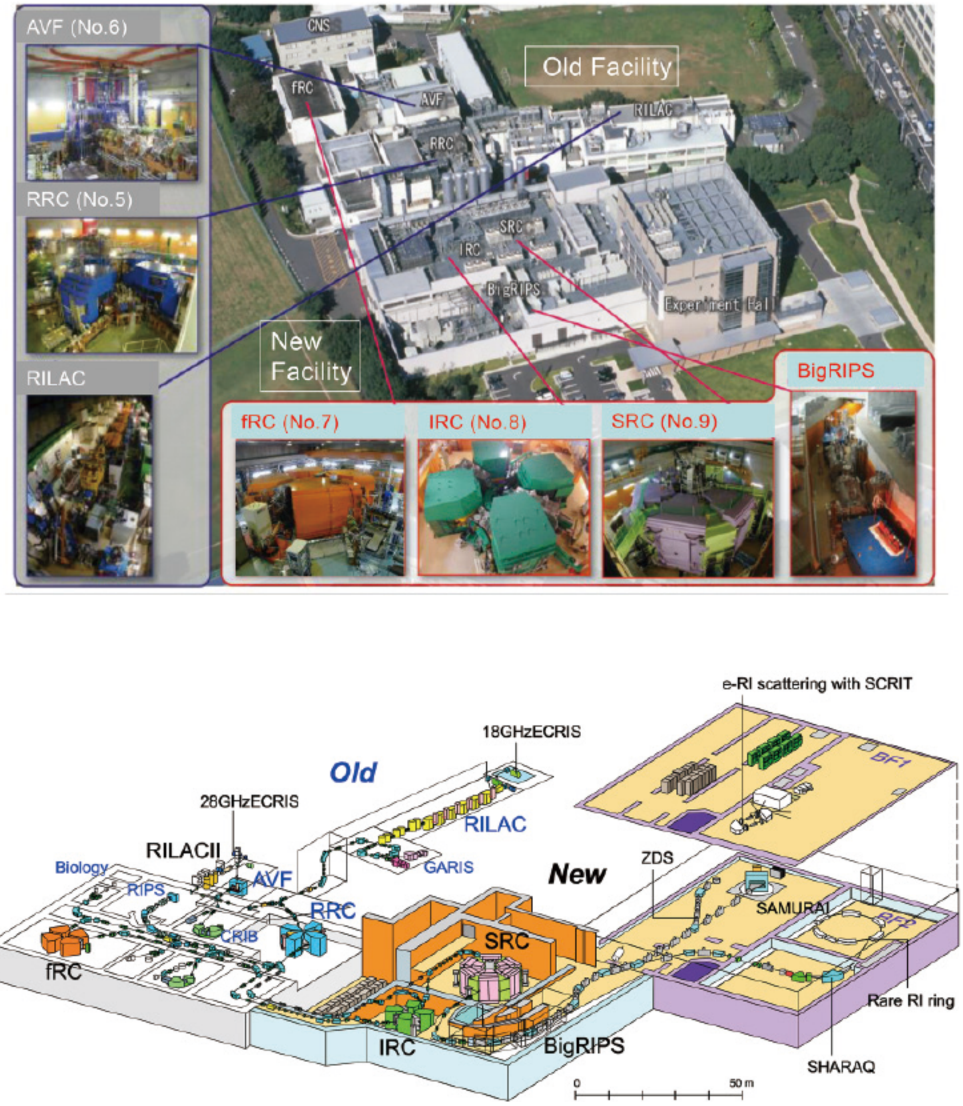



図 4：RIBF 建物全景航空写真（上）と建屋内の加速器と実験設備の配置（下）AVF と RILAC 以外の加速器と実験設備はすべて地下室に収容されている。Old Facility と New Facility は地下で繋がっている。RIBF は第 4 号 160 cm サイクロトロンとその研究棟を解体・撤去して建設された。

いのではないかと思う」—となっています。不幸にも松田先生は事故で急死され、上坪先生が熊谷先生の後を継いでサイクロトロン研究室の主任研究員に着任されます。1972 年、上坪先生の提案で重イオンリニアックと AVF を前段加速器としリングサイクロトロンを後段加速器とする重イオン複合加速器構想が実現へ向けて動きだします。

この構想の meson factory を RIBF に置き換えて考えてみますと、このころから RIBF へのレールが敷かれていたようで感慨深いものがあります。「仁科先生的なスケールの大きな考え方に合致した」RIBF かなと思います。

さて、先ほど（図 1）の赤線で囲った部分をクローズアップするとこのようになっています（図 4）。RIBF は上坪先生が建設した旧施設 Old Facility に新施設 New Facility を増設したものです。両施設は地下で繋がっています。

旧施設の加速器は、さきほどお話しましたように、5 号の理研リングサイクロトロン RIKEN Ring Cyclotron（RRC）が主加速器となっていまして、理研リニアック RIKEN Linear Accelerator（RILAC）と 6 号の AVF サイクロトロン（AVF）がその前段加速器になっています。リングサイクロトロン ring cyclotron、別名、分離セクター型サイクロトロン separate sector cyclotron というのは AVF の周回方向磁場の強弱の度合いをさらに大きくして収束力をさらに強くするため、扇型のマグネット― sector magnet といいます―を 4 台分離して配置し、イオンが磁場のある領域とない領域を交互に 4 回通過させるようにしたものです。RRC では 1 周の軌道は角の丸まった四角形となります。1968 年ミシガン州立大学の理論家 M. Gordon が提唱しました。sector magnet の数を増やせばさらに強い収束力が得られるので、経済性を問わなければ原理的には加速エネルギーをいくらでも高くできます。また、シンクロトロンと違って入射ビームを全て連続的に加速、出射できるので大強度ビームが得られます。1974 年にスイスの Paul Scherrer Institute（PSI）に世界初の 6 セクターリングサイクロトロンが完成しましたが、このサイクロトロンは今なお世界最大ビームパワー 1.4MW の陽子ビームを供給しています。

6 号の AVF はイオン源を外部に設置してイオンをサイクロトロンの真上から中心に入射する方式になっていまして、この方式は日本では初めてです。イオン源としてはわが国初の ECR（Electron Cyclotron Resonance）重イオン源と偏極重陽子源を搭載しています。この AVF の設計当初、日本には ECR イオン源の経験がなかったので、大型の AVF と従来の PIG イオン源の構成を考えましたが、ECR イオン源技術の将来性を見込んで敢えて ECR 技術に挑戦して現在の外部イオン源搭載型の中型 AVF を実現しました。これによって旧施設の建設予算を大幅に削減することができました。

ECR イオン源も高エネルギーの電子で分子を電離するところは PIG 型と同じです。PIG は静電場で電子を加速しますが、ECR の場合は高周波電場を使います。すなわち電子を磁場中でサイクロトロンのように高周波の電場で加速します。但し周波数が高いので

マイクロ波を使います。ECR は PIG より高エネルギーの電子が得られ、それで分子を衝撃するので高電離のイオンができます。加速エネルギーは電荷と加速電圧の積ですから重イオン加速器の加速効率が格段に上がります。フランスのプラズマの研究者 R. Geller が発明したものですが、私たちが採用に踏み切ったときはまだ将来性がはっきりしていませんでした。ECR イオン源の性能はマイクロ波の周波数を上げれば良くなりますが、イオンの電離で生じるプラズマをより強力なミラー磁場とカスプ磁場で閉じ込める必要が生じます。私たちは 10 GHz、18 GHz と周波数の高い ECR に挑戦し、図 4 の 28 GHz ECRIS では超伝導電磁石になっていまして、世界最高性能を誇っています。

RILAC は小寺正俊先生（元熊谷研、初代リニアック研究室主任研究員）の発明で世界唯一の加速周波数可変型です—後段の RRC が周波数可変を想定したために、周波数可変が要請されました。

旧施設の建設は 1975 年にまず RILAC から開始し、RRC が 1986 年に完成、AVF が 1989 年に完成、主力実験装置である RI ビーム分離装置 RIPS（RIKEN Projectile fragment Separator）が 1990 年に完成しフル装備になりました。15 ヶ年の歳月を要しました。

さて新施設のお話をいたします前に、生物応用の話を少しだけしたいと思います。中根先生のお話にありましたように日本の放射線生物学は仁科研究室で生まれました。昭和 18 年の理化学研究所案内には、武見太郎先生の名前があります。先生は元医師会長で放射線医学の草分けです。以来この放射線生物の伝統を 160 cm サイクロトロン施設も旧施設も継承しております。図 4 の旧施設の左端に Biology の照射室があります。実は、この照射室、理研のすぐ隣にあります国立埼玉病院と提携して「アルファ線がん治療」を行うために作りました。患者さんをこの部屋に運ぶために入り口もエレベータも独立になっています。しかしながら、このがん治療はたしか中曽根首相の「がん撲滅十ヶ年計画」の中で放医研が行うことになりまして、理研は放医研の重粒子線がん治療の基礎研究に協力することにしました。

図 5（上）は、がんを植え付けたネズミを張り付けにして炭素ビームを照射しているところです。照射装置は放医研が作り理研が重イオンビームを供給します。がん治療のポイントは体内のがんの位置に重イオンビームのブラッグピーク（細胞に一番エネルギーをあたえるところ）—エックス線回折の研究でノーベル物理学賞を受賞した W. Bragg が提唱しました—がくるようにエネルギーを調節してがん細胞は殺すが途中の正常細胞には余り

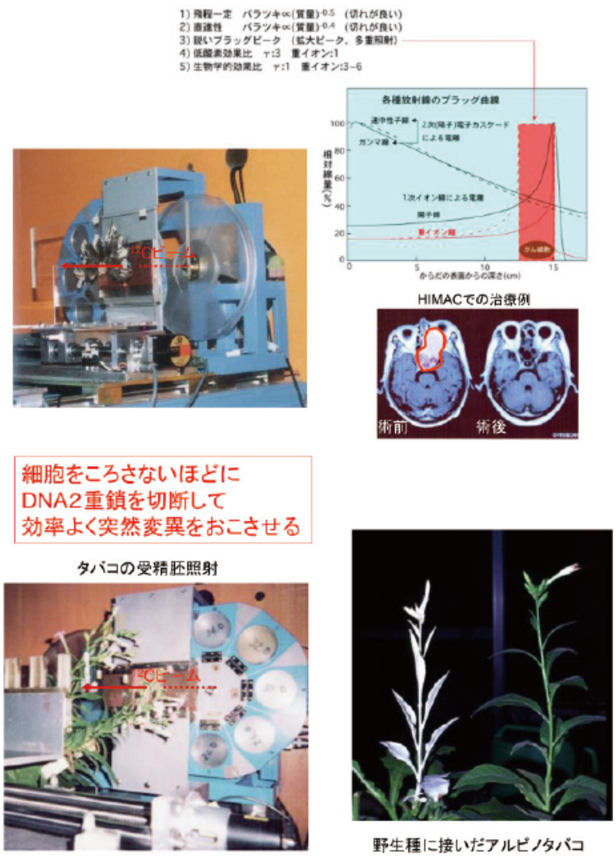



図 5：（上）放医研のネズミを使った重粒子線がん治療の基礎研究（下）植物の重イオンビーム品種改良法の開発

影響がないようにするということです。この研究開発は AVF が完成して核子あたり 135 MeV の軽イオンビームが利用できるようになって 1991 年から始まりました。1994 年には HIMAC が完成し治療が始まります。右下の写真は眼球と脳の間に大きながんができ治療不能とされた初期の患者さんの PET 写真です。赤く囲ってあるところががんです。ここに炭素線をうまく照射してがん細胞を殺すのに成功して、治療不能といわれたこの患者さんはみごとに治りました。今では、群馬県、兵庫県、佐賀県、福井県、山形県で重粒子線がん治療装置が稼働中か建設中と聞いています。

HIMAC が完成後、その生みの親であります平尾泰男先生（元放医研所長）に命令されて治療以外の実験に HIMAC を使うための外部利用課題採択委員長の初代に任命されまして、これをながらく務めました。平尾先生いわく「君は放射線生物も良く知っているし核物理も良く知っているので適任じゃ」でしたが真相は、放射線生物もよくわからず、核物理はまったく素人なので中立ではありました。

さて話はかわりますが、古きよき理研の主任研究員はよく一緒に飲みました。私の飲み仲間に吉田茂男植物機能研究室の主任研究員がいまして、ある花見の夜、吉田さんから生物学では突然変異体ができるといろいろ重要な知見が得られると聞かされます。では、重イオンで照射してみたらと持ちかけたところ吉田さんは「何それ」といって、まあ初めて

聞く言葉だったのでしょう。放医研の実験の話をしたら乗ってきまして、ではやってみようということになったのですね。何も起きないか全部死んでしまうか—吉田さんだけでなく私もそう予想しました。

照射条件が二つあるところが予想を難しくしています。Linear Energy Transfer（LET）—物理でいうエネルギー損失ですね—と Dose —照射線量ですね—を両方最適にしないとうまくいかないわけです。放医研のデータで細胞を殺す量はおよそ分かっていますが、DNA の 2 重螺旋をほどほどに切って再生させて突然変異を起こさせるデータなぞどこにもないので、カンで決めるしかなかったのですが、まあこんなものかなと決めましてやりました。図 5（下）の写真の左は、たばこの照射をやっているところです。ネズミの代わりにたばこが縛りつけてあります。そうしたら生物学者がびっくりしたのは、めったにお目に掛かれない葉緑体のない—アルビノというそうです—突然変異体がいっぱいできました。私が決めた照射条件は—後でわかりましたが—まことにまぐれ当たりでした。これが始まりでこの方法は実用化され、花卉園芸、樹木、日本酒、わかめ、米などの有用突然変異の作出に利用されて市場を拡大しております。あいかわらず仁科センターの生物学者と物理学者がタッグを組んでやっています。この業績は 2 度も文部科学大臣賞に輝きました。

この成果をたまたま吉田さんの研究室に来ていた全米植物生理学会長の Bob Buchanan カリフォルニア大学教授に話しましたら、ローレンス夫人がまだご存命なので、彼女にこの理研の成果を話したいといって帰国しました。しばらくして Buchanan 教授が私に、これはローレンス夫人の直筆の手紙（図 6）だから宝物にするようにといって送ってくれました。図 7 はそれを清書したものです。こ

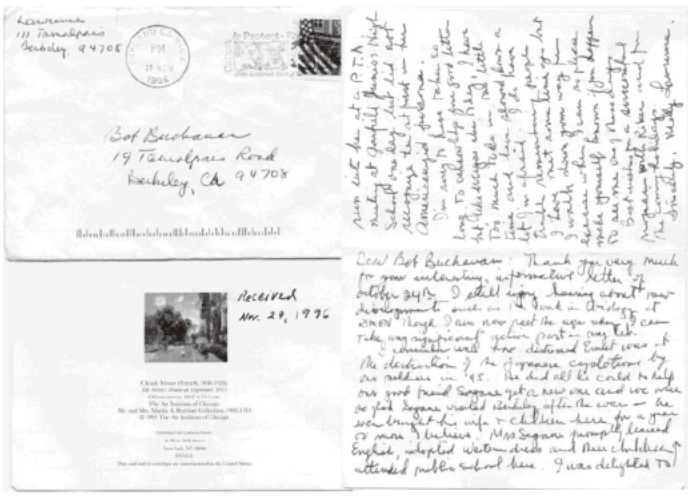
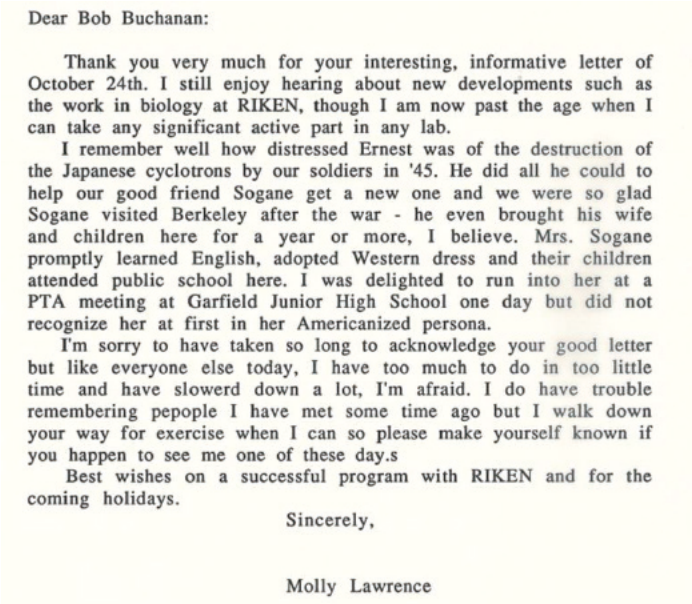



図 6：Lawrence 夫人から全米植物生理学会長 B.Buchanan カリフォルニア大学教授への手紙（1996 年 11 月 29 日）



Dear Bob Buchanan:

Thank you very much for your interesting, informative letter of October 24th. I still enjoy hearing about new developments such as the work in biology at RIKEN, though I am now past the age when I can take any significant active part in any lab.

I remember well how distressed Ernest was of the destruction of the Japanese cyclotrons by our soldiers in '45. He did all he could to help our good friend Sogane get a new one and we were so glad Sogane visited Berkeley after the war - he even brought his wife and children here for a year or more, I believe. Mrs. Sogane promptly learned English, adopted Western dress and their children attended public school here. I was delighted to run into her at a PTA meeting at Garfield Junior High School one day but did not recognize her at first in her Americanized persona.

I'm sorry to have taken so long to acknowledge your good letter but like everyone else today, I have too much to do in too little time and have slowerd down a lot, I'm afraid. I do have trouble remembering pepople I have met some time ago but I walk down your way for exercise when I can so please make yourself known if you happen to see me one of these day.s

Best wishes on a successful program with RIKEN and for the coming holidays.

Sincerely,

Molly Lawrence

図 7：Lawrence 夫人の手紙の文章

第 8 図：Lawrence 先生のご家族とともに（1936）

の手紙には長岡先生のご子息の嵯峨根遼吉先生がローレンスのもとに留学していたときのことが書かれています。図 8 はその時の写真です。嵯峨根先生は 1938 年に帰国され大サイクロトロンの建設に参加されます（図 2 の大サイクロトロンの記念写真で最前列右から 5 人目です）。

さて新施設の話をさせていただきます。

新施設では、旧施設の主加速器でありますRRC を前段にして、後段に 7 号の固定周波数リングサイクロトロン fixed-frequency Ring Cyclotron（fRC）、8 号の中間段リングサイクロトロン Intermediate Stage Ring Cyclotron（IRC）、そして 9 号の超伝導リングサイクロトロン Superconducting Ring Cyclotron（SRC）を追加していまして、RRC で加速器したビームの速度を fRC で 2 倍―リングサイクロトロンはイオンの速度の増倍器です。fRC の場合は取り出し軌道の長さが入射軌道の長さの 2 倍になっています―IRC でさらに 1.5

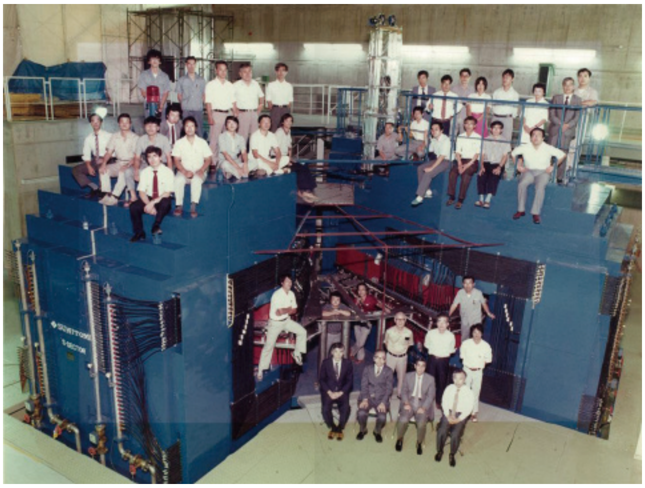
倍、そしてSRCでさらに1.5倍にしてウランまで全ての元素を光速の約70%まで加速できるようになっています。このようにして加速された高速重イオン（安定原子核）はRIビーム生成標的中の原子核との衝突で破砕されて多種類の高速RIビームになります、それらを標的下流の超伝導RIビーム分離装置Big RIKEN Projectile fragment Separator（BigRIPS）で実験に使用するRIビームに純化して実験設備に輸送するようになっています。

さて図4のRIBF建物の写真で、新施設と旧施設の間に先端が丸みを帯びた棒状のタンクが6本立っています。これらは、ヘリウムガスの高圧タンクでSRCの超伝導NbTiコイルを超伝導状態に保つための液体ヘリウム5,000リットルとBigRIPS用5,000リットル、合わせて10,000リットルの液体ヘリウムを一時的に高圧ガスとして貯蔵するためのものです。このようにRIBFは日本でも有数の大規模液体ヘリウム冷凍液化施設になっています。

図4の建物の左下隅のBigRIPSの文字のあたりに最近話題になっておりますコジェネCo-Generation System（CGS）があります。これもRIBFの特徴のひとつでして、世界で初めて大型加速器施設にCGSを導入しました。CGSは熱電併給設備というのですが、東京ガスから天然ガスを買いガスタービンで自家発電します。電気出力6.5 MWに加え排出される高温高圧の水蒸気を吸収式冷凍機で再利用して3.3 MWの冷房能力をうみ出します。これは、東電からの給電が止まったときでも液体ヘリウムの安定供給ができるようにするための非常用電源にもなります。またエネルギー大量消費施設でCO2排出による環境負荷を減らすことを目指したものです。

同じく写真の左上端にCNSという文字があります。この建物は東大の原子核科学研究センターCenter for Nuclear Studyで、RIBFに独自の加速器設備と実験設備を建設して仁科センターとRIBFの共同運営をしています。今やRIBFは日本の原子核研究の中心拠点と言えますが、こういう研究推進の体制づくりは仁科研究室からの伝統です。現在は、さらにKEKの原子核研究グループがRIBF棟内に支所をつくり共同運営に参画しています。

東大CNSのRIBFへの移転話は、当時CNSの初代センター長であった石原正泰東大教授と私で立案しまして、石原さんが東大を説得し、私が小林前理研理事長を説得して実現しました。まだ文科省が生まれる前でしたので、役所を説得するのがひと苦労でした。これで私の仁科センターをハブ研究所にする構想が一歩前進します。



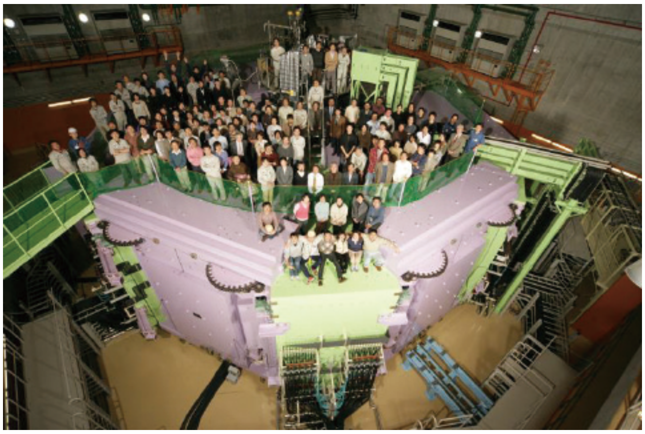


図 9：（上）1985 年 5 月に RRC の磁場測定が完了したときの記念写真（下）2005 年 11 月 SRC の定格励磁に成功したときの記念写真

サイクロトロンの電磁石ができると皆で記念写真をとるというのがどうも仁科先生からの伝統になっているようなんですね。図 9 は上が 1985 年 5 月に RRC の磁場測定が終わってとった記念写真で、最前列の椅子に腰かけているのは、右から、小寺先生、中根副理事長、宮島龍興理事長（元仁科研究室）、上坪先生です。上坪先生の真上に私がいます。下は 20 年後の 2005 年 11 月 5 日なのですが、SRC の超伝導電磁石を定格まで励磁することに成功したのを祝ってとった記念写真です。磁石の上に乗っている人の数から、SRC がいかに大きいかお分かりいただけると思います。

私は 2 度今上天皇陛下にサイクロトロンをご説明する光栄に浴しました。1 度目は RRC でやっと成果が出始めた 1992 年の 3 月です（図 10 左）。天皇陛下の後ろにいらっしゃるのは小田稔元理事長です。理研では初めての行幸でしたので、私だけでなく理研全体が緊張していたのをよく覚えています。2 度目は（図 10 右）、その 14 年後ですが、RIBF が始動する直前の 2006 年 10 月です。このときは皇后様もご一緒でしたので、行幸啓というのだそうです。天皇陛下の後ろにいらっしゃるのは野依理事長です。因みに図 11 は 1937 年に秩父宮親王殿下（昭和天皇の弟宮）に仁科先生が小サイクロトロンの加速装置をご説明している写真です。日本の Royal Family は世界で最もサイクロトロンに詳しいと思いま


図 10：（左）RRC の上で天皇陛下にご説明（右）SRC の前で天皇皇后両陛下にご説明

す。

2007 年 3 月に SRC と BigRIPS が予定通り完成し、ウランビームから RI ビームを生成することに成功しました。このとき、6 月には原子核に関する国際会議としては最大の International Nuclear Physics Conference 2007 が有楽町の東京国際フォーラムで開催されることになっていましたので、この国際会議で最初の実験結果を発表すべく、国際共同実験チームと加速器グループは満を持して初実験にのぞみました。実験はうまくいって、会議開催の 3 日前、実験データの最終確認を終え緊急発表することになりました。図 12 は私が登壇しているところの写真です。発表は「U-238 を核子あたり 345 MeV まで加速し Be 標的で対称核分裂を起こさせ、核分裂片の中に新同位元素 Pd-125 を発見した」というものです。この RIBF 始動の速報は大喝采を浴び、RIBF はド

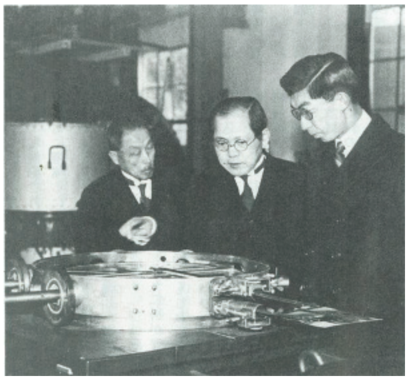


図 11：1937 年 11 月の秩父宮親王殿下のご訪問


図 12：International Nuclear Physics Conference 2007 での RIBF のデビュー　開会式では、天皇皇后両陛下がご臨席された。

ラマティックなデビューを果たしました。発表後すぐに RIBF 計画の国際諮問委員会の委員長をながらく務めていただいた P. Kienle 先生（元ドイツ重イオン加速器研究所 GSI 所長）が私のところにきて満面の笑みを浮かべて祝福していただきました。先生は 2013 年 1 月に他界されました。私はこの INPC2007 の後続いてアメリカの Particle Accelerator Conference に招待され、RIBF 始動の報告をいたしました。この時は、講演後 RIBF 国際技術評価委員会の委員長を務めていただきました H. Blossor 先生（米国国立超伝導サイクロトロン研究所 National Superconducting Cyclotron Laboratory（NSCL）の創設者）が私のところに来て絶賛していただきました。H. Blossor 先生は 2013 年 3 月他界されました。両先生には衷心より感謝の意を表するとともにご冥福をお祈りしたいと思います―両先生とも SRC は本当に実現するのかと大変心配されましたが、それは、ドイツのミュンヘン工科大学 MTU、フランスの国立重イオン加速器研究所 GANIL、アメリカの NSCL、ロシアの JINR での設計が現実的ではなくすべて幻に終わったことをよく御存じだったからだと思います。

仁科先生は速中性子によるウランの対称核分裂片の中に Pd-112（Y. Nishina, T. Yasaki, K. Kimura, M. Ikawa, “Fission products of Uranium by Fast Neutron”, Phys. Rev. 58, 660（1949））を発見されましたが、今回 Pd-125 を発見した核反応はいわばその逆反応になっていまして、Pd-112 はもしかしたら Pd-125 の片割れであったかもしれません― Pd の原子番号は 46、ウランの原子番号は 92 ですからウランが真っ二つに分裂したことになります。

高速重イオン（安定核）ビームから RI ビームを発生させる方法は、1970 年代初頭に反陽子の発見で有名な LBL の高エネルギー重イオン弱収束シンクロトロン BEVALAC で開発されて（H. Heckman et al. “Fragmentation of Nitrogen-14 Nuclei at 2.1 GeV per nucleon” Science 174, 1130（1971））、1974 年に最初の実験が行われました。実験は生物への応用で、O-16 ビームから入射核破砕反応で―次に説明します―陽電子放出核種の O-15 ビームを発生させ動物の脳にうち込んで脳中の血液循環を調べるというものだったそうです。また「RI beam」という語はこのとき生まれたようです。その後不安定な原子核の研究に使われるようになり、1980 年代初頭に谷畑勇夫博士（元リニアック研究室主任研究員）、故杉本健三先生（大阪大学名誉教授）たちの Li-11 核の中性子ハロー構造の発見へとつながります。Ne-20 ビームから Li-11 ビームをつくりその大きさを測ってみたら異常に大きかったということだそうです。1989 年谷畑博士はこの業績で仁科記念賞を受賞しました。原子核は、例えば Pb-208 のように陽子数 82 と中性子数 126 が大きく違っていても陽子の占める体積と中性子の占める体積はほぼ同じであるという「核力の飽和性」を持つと考えられていましたが、これが覆りました。因みにこの飽和性は R. Hofstadter（1961 年「線型加速器による高エネルギー電子散乱の研究と核子の構造に関する発見」でノーベル物理学賞）の実験で明らかになりました。RIBF では、この電子散乱法で不安定核の構造を明らかにし

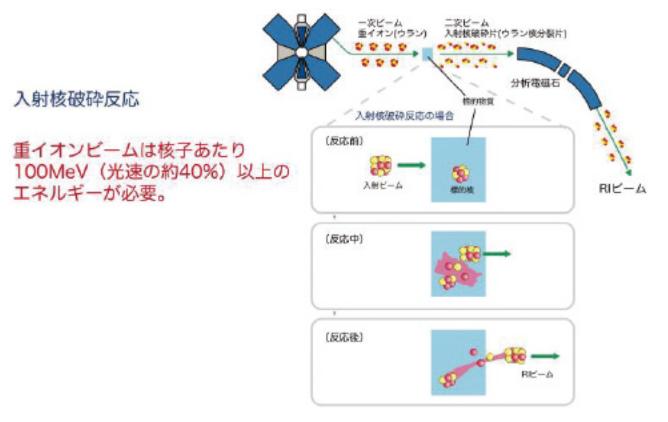



図 13：入射核破砕反応 Projectile Fragmentation


図 14：2006 年 12 月号のサイエンス誌、ネイチャー誌の RIBF 完成記事

ようとしています。

図 13 が高速 RI ビーム発生原理の簡単な説明です。高速の安定核（入射核）が標的中の原子核と衝突すると入射核に含まれる何個かの中性子と陽子がそぎ落とされ（入射核破砕反応）、破片が種々の RI となって前方に集中して放出されます。これを分離・収集して RI ビームを発生させるというものですが、なにしろ生成率が極めて小さいので、大強度で高エネルギーの入射核ビームが要るわけです。標的には原子核の密度が高く融点の高い Be の水冷回転板が使用されます。入射核をウランにすると、入射核破砕反応も起こりますが、核分裂による RI ビームの生成が優勢になります。このとき、標的を Be にするとウラン核の励起が大きくなって対称核分裂になり、Pb のような大きな原子番号の物質を標的にすると高電場による核分裂がおきますが、ウラン核の励起は小さく非対称核分裂が優勢になります。速い中性子による対称核分裂、遅い中性子による非対称核分裂に対応しています。

図 14 は RIBF の完成を報じる 2006 年 12 月号のサイエンス誌とネイチャー誌の記事です。

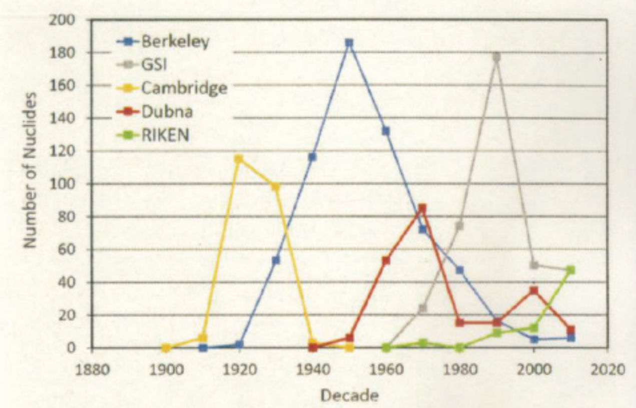



**Figure 1.** *Number of nuclides discovered per decade at the top four laboratories, Berkeley, GSI, Cambridge, and Dubna. In addition, RIKEN is included because of the significant number discovered during the last decade.*

図 15：M. Thoennessen, “The Discovery of Nuclides”, Nuclear Physics News, Vol.22, No.3, 20, 2012. より転載

この辺ちょっと見えないかも知れませんが、何が書いてあるかというと、「今後 5、6 年で日本はナンバーワンの座を失うかもしれない」とフランスの GANIL 研究所のシドニー・ガレス Sydny Gales 所長（RIBF の国際評価委員）が言っているのですね。ということは、5、6 年は RIBF は世界一であるということになります。こちらも 5、6 年ではそう簡単に負けませんから、ずっと 1 位ということになろうかと思います。NSCL の FRIB 施設と GSI の FAIR 施設が建設中でやがて RIBF に追い付きますが、2015 年の時点では後 5、6 年は少なくとも世界に冠絶であることが決まっています。

その後 RIBF の性能は後輩たちの数々の発明と工夫―特にイオン源と荷電変換装置の開発では目覚ましいものがあります―で飛躍的に向上して、例えば 2007 年から 2014 年までに 130 種類を超える新同位元素を発見しました。驚くべきはこれに要した日数がわずか通算 30 日間ということです。

面白いデータがあります。図 15 です。どの研究所がいくつくらい新同位元素を発見したかというものです。これによると 1920 年をピークにした英国 Cambridge 大学 Cavendish 研究所の新同位元素発見時代―仁科先生が滞在していた頃ですね― 1950 年をピークにした米国 LBL 時代、1970 年をピークにしたソ連の JINR（Dubna）時代、1990 年をピークにしたドイツ GSI 時代に続く、今や 130 種類以上になっていますから第 5 のピークを RIBF が形成しようとしていることがはっきりとわかります。RIBF はまさに世界に冠絶する RI ビーム生成能力に至ったと言えますね。

これらの新同位元素は非常に中性子の多い原子核です。これまで安定核とその近傍の不


図 16：第 5 号 RRC サイクロトロンからのファーストビーム取り出し成功の記念写真

安定核で成り立っていた「核力の飽和性」や 1963 年のノーベル物理学賞に輝いた M. Mayer と J. Jensen が提唱した「原子核の殻模型」がこんな中性子過剰な原子核でも成立するのか—その検証実験が RIBF でできるようになりました。RIBF の最近の実験結果はどうも新しい原子核のモデルが必要だといっているようです。また、元素の起源研究ですが、RIBF で人類はやっと超新星爆発のときに一瞬できて消えてしまった超中性子過剰な原子核を実験室でつくりだせるようになってきました。これからが楽しみです。

さてこの RIBF ですけど、いつごろからこんな計画を考えていたのかと言いますと、大変前です。まず、この写真（図 16）から始めます。これは、1986 年 12 月 16 日 15 時 34 分に RRC からファーストビームを取り出したとき加速器制御室— RIBF の制御室もここになります—でとった記念写真です。私の一人置いて右に居るのが後藤彰さんで、その右に居るのが加瀬昌之さんです。以来 RIBF 完成まで、この三人は苦労を共にすることになります。万歳をしているのは故元永昭七サイクロトロン研究室副主任研究員で旧施設建設の隊長です。これから 20 年後の 2006 年 12 月 28 日 16 時 00 分に第 9 号 SRC が産声を上


研重イオン加速器研究施設の将来を展望してみよう。

加速器の利用は，加速器から発生する高速粒子線自身を利用してきた時代から，電子加速器におけるシンクロトロン放射光，陽子加速器における中性子，$\pi$，K 中間子線のように 2 次粒子線を利用する時代へと大きく移行しつつある。重イオン加速器における利用度の高い 2 次粒子線が不安定同位元素(RI)ビームであることはいうまでもない。高範囲のエネルギーをカバーする良質・大強度の“RI ビーム工場”ともいうべき施設の実現は，反応させる入射核と標的核およびそれらのエネルギーの組合せを飛躍的に拡大するので基礎科学から応用科学にわたる分野の研究者に，次代のきわめてプロミッシングな研究手段を提供する。理研の加速器研究施設が 21 世紀に向けてこのような方向に発展する夢をわれわれは描いている。

[矢野安重，石原正泰]



図 17：1987 年 6 月号のパリティに掲載した理研リングサイクロトロン始動の記事

げます。

因みにこの 1986 年の 11 月には KEK の TRISTAN が始動しましたので、1986 年は、戦後欧米に大きく水をあけられていた日本の加速器界にとってはやっと世界に追い付いた画期的な年となりました。

理研では、この年にこんなこともありました。8 月に 160 cm サイクロトロン実験棟内で核化学の実験者が内部被ばくをする事故がありました。これを新聞が大きくとりあげ理研の構内ではしばらく加速器の運転が禁止されました。10 月には第 11 回サイクロトロン国際会議を池袋で主催しましたが残念ながら RRC ファーストビームの報告ができませんでした。さらにこのファーストビームのときに RRC が真空漏れを起こし、これを新聞が放射能漏れのごとく報じたために、役所から「理研は運転体制を整えるまで今後 RRC の運転開始はまかりならぬ」というお達しがあり、それに応えるため、加速器、原子核、応用研究の研究室からなる理研加速器研究施設 RIKEN Accelerator Research Facility

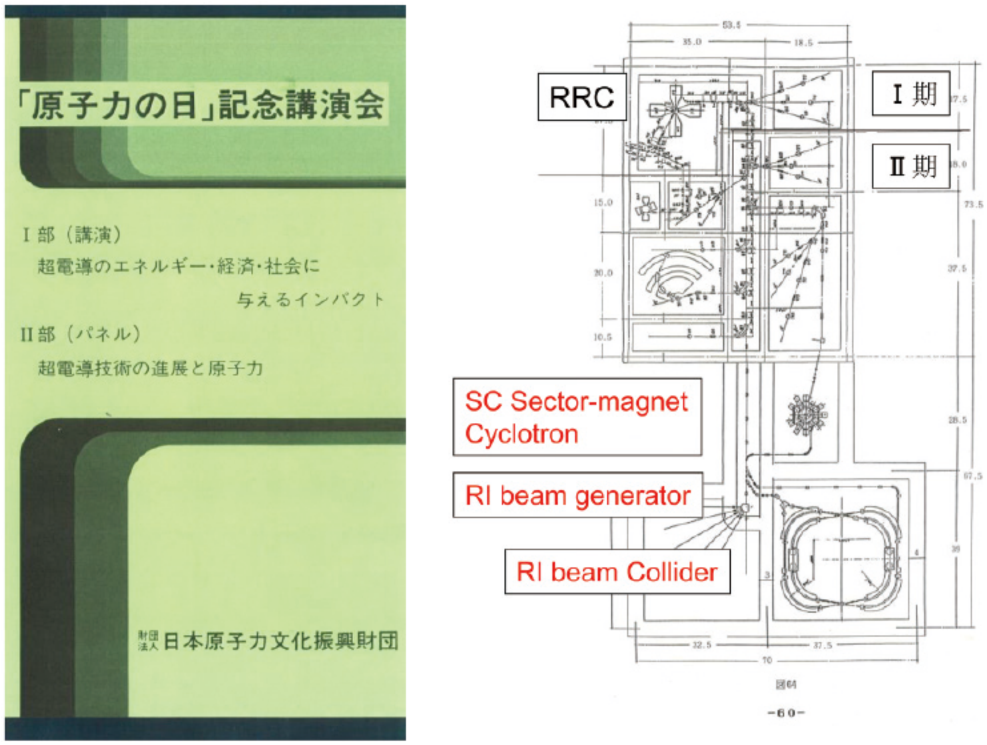
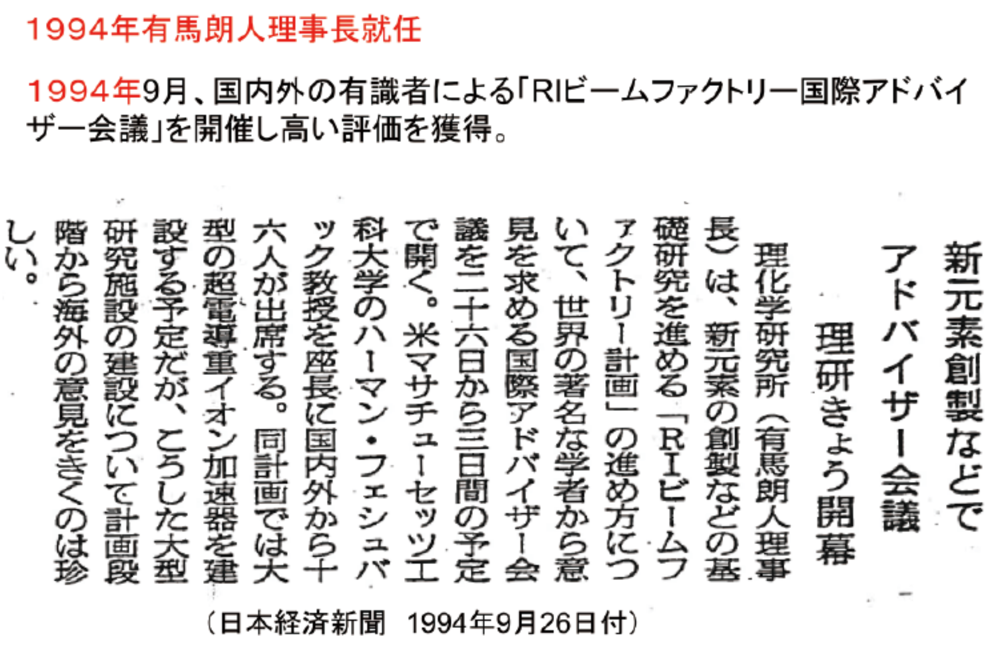



図 18：1987 年 10 月に行われた「原子力の日」記念講演会の講演録のなかから

（RARF）という研究体制が生まれます。初代の施設長は石原正泰放射線研究室主任研究員です。禍を転じて福としたといえます。また私はこのとき、放射能漏れは決して起こしてはならぬということと、良いと思われる計画が多くの人々に支持されるとは限らないということを学びました。放射線安全の教育と地元と一般社会に加速器科学の魅力をしっかりと広報することが肝心であるということです。この RARF を母体にして理研ではもっとも長い伝統を誇る「理研仁科センター」が誕生することになります。

図 17 は RRC が始動して翌年に雑誌「パリティ」に掲載した記事です。私と石原さんの共著となっています。リングサイクロトロンの建設 15 年の話の最後に、将来の夢として「RI ビーム工場」を実現したいと書きました。旧施設の建設は予算上、I 期と II 期に分けてありまして、石原さんの主導で建設が進められることになります RIKEN Projectile fragment Separator（通称 RIPS）の構想は I 期で練られて、II 期で着工、1990 年から実験開始となります。RIPS の構想が「RI ビーム工場」の夢をふくらませたようです。

やはり同じ年ですけども、「原子力の日」記念講演というのがありまして、「超伝導技術



1994年有馬朗人理事長就任

1994年9月、国内外の有識者による「RIビームファクトリー国際アドバイザー会議」を開催し高い評価を獲得。

新元素創製などで
アドバイザー会議
理研きょう開幕

理化学研究所（有馬朗人理事長）は、新元素の創製などの基礎研究を進める「RIビームファクトリー計画」の進め方について、世界の著名な学者から意見を求める国際アドバイザー会議を二十六日から三日間の予定で開く。米マサチューセッツ工科大学のハーマン・フェシュバック教授を座長に国内外から十六人が出席する。同計画では大型の超電導重イオン加速器を建設する予定だが、こうした大型研究施設の建設について計画段階から海外の意見をきくのは珍しい。

（日本経済新聞　1994年9月26日付）

図 19：RI ビームファクトリー計画国際アドバイザー会議開催の新聞記事

の進展と原子力」のセッションで、理研リングサイクロトロン施設の将来計画として超伝導セクター電磁石によるリングサイクロトロンの建設の話をしました。図 18 に私が提示した構想図があります。現在の RIBF とは反対側に新施設を建設する計画になっています。因みにこの時点ではⅠ期だけが完成しⅡ期の AVF サイクロトロンも実験室の下半分も建設されていません。また RIPS もありません。この構想図には RI 衝突型リングが描いてありまして、いい加減なポンチ絵ですね。

1987 年は、高温超伝導で熱狂した年で、また小柴昌俊先生が超新星 1987A からのニュートリノをカミオカンデで捉えた画期的な年でもあります。RIBF での中心的な研究の柱が超新星爆発による重元素合成メカニズム（E. Burbidge, G. Burbidge, W. Fowler and F. Hoyle, “Synthesis of the Elements in Stars”, Rev. of Modern Phys., Vol.29, Num.4, 547, 1957）の実験室での検証にありますので、因縁めいているなと思っています。話しがすこし前後しますが、RIBF 建設が始まってすぐ、部下が「元素誕生の謎にせまる」という科学映画のビデオを製作してくれました。実によくできています。この業績は文部科学大臣賞に輝きました。私はこのビデオを RIBF の夢の広報に大いに活用しました。

建設の話に入ります。1990 年に旧施設が現在のようにフル装備になります。重イオン

ビームの性能は、GANIL、MSU、GSIに並んで世界第一級です。私は、世界第一級ではなく、「世界に冠絶する」性能にしたい、そうして世界の優秀な頭脳を魅了し理研に結集させたいと思うようになります―この「世界に冠絶する」ですが、あるとき用字辞典を読んでいてたまたま見つけていつか使ってやろうと決めていた言葉です。しかし何しろ建設予算がたいへん大きいのですね。幸運だったのは小田稔理事長の後に原子核物理の大家でいらっしゃる有馬朗人先生が1994年理化学研究所の理事長になられたことです―RIBF計画は小田理事長の時代に仕込まれました。私の提案を聞いて早速、有馬先生がこういう大型の施設をやるときには国際評価を受けんといかんということを言われまして、有馬先生の肝いりで国際的な評価を受けました。図19は、RIビームファクトリー計画国際アドバイザー会議開催の新聞記事です。この後、RIBF計画はほぼ毎年のように国内外の評価を受けるようになります。

1994年5月21日付の私のメモ「RIビームファクトリー加速システム構想」がありまして、その中でECRイオン源→RFQ→RILAC→RILAC Ⅱ→CS→RILDC→RRC→SRCの重イオン加速器システムを提案しています。これがRIBFの最初の具体的な提案です。RILAC Ⅱ→CS→RILDCのところは新設です。このアイデアは、現有のRILACで加速したウランビームをRILAC Ⅱでさらに加速しておいて荷電変換Charge Stripper用炭素膜に通し、より電荷の高いウランイオンにし、それをRILDCでRILAC出口の速度まで減速deccelerateしてRRCに入射するという、まことに加速器屋としては「やってはならない」設計なのですが、当時はまだ私たちのECRイオン源技術が高くなかったために苦肉の策でした。

これどうなったかといいますと、このRILAC Ⅱは東大CNSの予算を使って私の部下が新設しました。図4のRILACの後段にタンクが6台描いてありますが、それです。この部分の増設で超重元素合成実験に必要なエネルギーが得られるようになり、リニアック実験室のGARISという実験装置で、2004年の7月に最初の113番新元素発見のイベントを観測し後輩の森田浩介博士は2005年にこの業績で仁科記念賞を受賞しました。そして2012年8月には決定的なイベントを観測しました。

吉原賢二先生（東北大学名誉教授）によると日本では、1900年代初頭に小川正孝先生（元東北大学総長）がレニウムReを発見していたにもかかわらずテクネチウムTcだとしたために元素の命名権を逃したそうです（K. Yoshihara "Nipponium as a new element（Z=75）separated by the Japanese chemist, Masataka Ogawa: a scientific and science

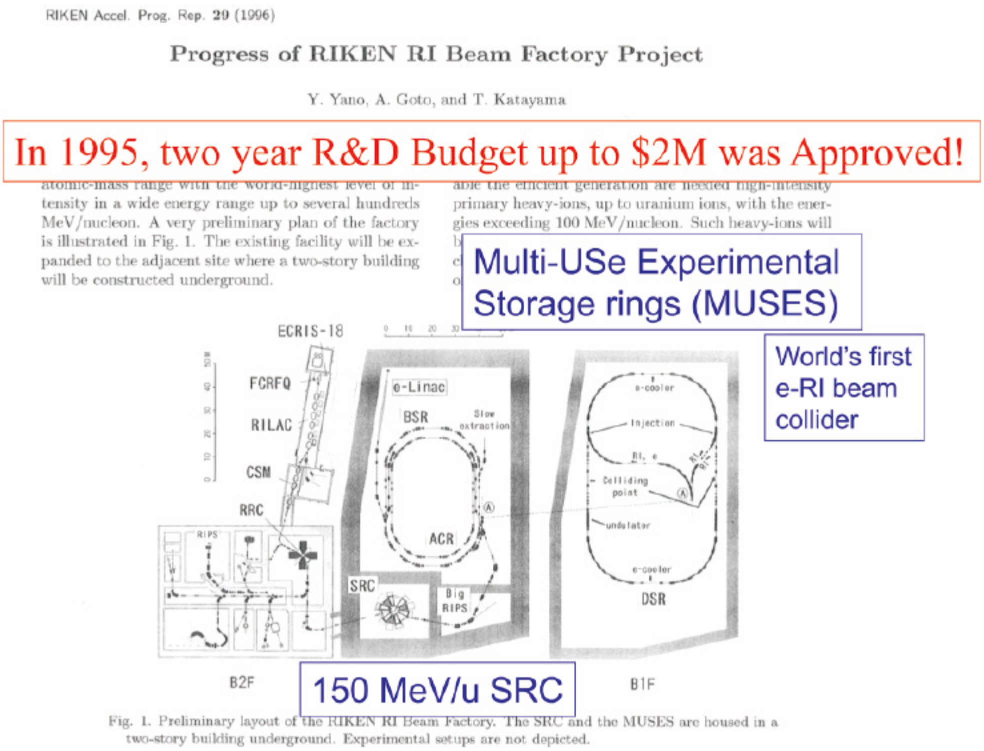



図 20：最初の RIBF 計画構想

historical re-evaluation”, Proc. Jpn. Acd. Ser. B84 232（2008））。1909 年の周期表には Tc のところに Nipponium Np と記されています（F. Loring, “The Atomic Weights as Mathematical Functions”, Chem. News Vol. C., No. 2611 281（1909））。また、中根先生のお話にもありましたとおり仁科先生と木村先生もネプチニウム Np を発見していたにもかかわらず、Re を担体にしたために命名権を逃したという歴史があります。Re にしてやられ Np を逃したことになります。果たして、3 度目の正直となりますか—お楽しみというところです。

RILDC はどうなったか。製作しましたが、必要ないということが分かりまして、ただ据え置いているだけになってしまいました。簡単には諦めないのが私たちで、これは、図 4 の AVF 室の新入射器 RILAC Ⅱの主たる部品として再利用されました。この新入射器のおかげで RIBF 実験と超重元素実験が同時並行して走れることになったのです。

さて、まことにいろいろな駆け引きがありましたが、1995 年度に約 2 億円の準備研究費が認可されます。図 20 は国際アドバイザー会議に提示した RIBF 構想です：RRC で加速した重イオンビームを 1 台の SRC で核子あたり 150 MeV まで加速し、BigRIPS で RI

## Design Study of the Injection System of the Superconducting Ring Cyclotron (III)

H. Okuno, T. Tominaka, T. Kubo, T. Mitsumoto, T. Kawaguchi, Y. Tanaka, S. Fujishima, K. Ikegami, A. Goto, and Y. Yano

In the RI beam factory project,[1] the Superconducting Ring Cyclotron (SRC)[2] is designed to boost the energy of the ion beams from the existing RIKEN Ring Cyclotron (RRC) up to 400 MeV/u for light ions such as carbon and 150 MeV/u for very heavy ions such as uranium. In this report, we describe the status of the design study of the injection system for the SRC.

Figure 1 shows one of injection trajectories now under consideration. The beam is injected through one of the valleys into the central region of the SRC and is radially guided to the 1st equilibrium orbit. The transport system consists of three bending magnets (BM1, BM2, BM3), two magnetic inflection channels (MIC1, MIC2) and an electrostatic inflection channel (EIC). The injection energies required to get the maximum output energies for threee kinds of beams are shown in Table 1.

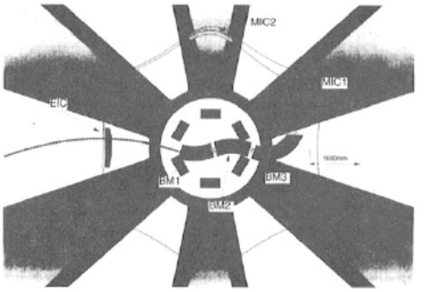



Fig. 1. The schematic layout of the SRC and an example of an injection trajectory.

valley region and the beam trajectory there changes largely depending on the kind of acceleration condition. The bending angle in the valley region is estimated to be about 50 degrees at the maximum. Figure 2 shows an example of the difference of beam trajectories in the valley region between U and Kr ions.

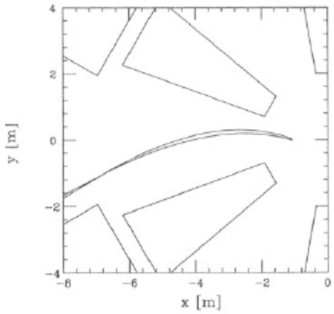



Fig. 2. Examples of beam trajectories in the valley region. The upper curve is a trajectory for U (150 MeV/u) acceleration and the lower is one for Kr (300 MeV/u).

The MICs are inserted between the poles of the sector magnets to increase the bending power of the sector field locally. The EIC is placed in the position where the injection trajectory is matched finally with the 1st equilibrium orbit. Characteristics of the injection elements are summarized in Table 2. The three bending magnets and MIC1 require to use superconducting coils to achieve the required fields. The sizes of the elements must be small enough so that they can be

図 21：SRC のビーム入射方式の検討例

ビームにして「世界初の電子と RI の衝突実験」を可能にするというものです。

いくつかポイントがあります。まず、さきほど説明した入射核破砕反応で RI ビームを発生するには核子あたり 150 MeV で十分である―これ以上核子あたりの入射エネルギーをあげてもさほど RI ビームの強度をあげられないと当時は考えていました。この施設の最大の目的は、こうやって作った不安定核と電子を衝突させてその電荷分布すなわち陽子分布を正確に測定しハロー構造を明らかにするというものです。RI ビームは原子核同士の衝突で生成するために必然的にエミッタンス（ビーム中の粒子の方向と速度の不揃いの度合）が大きいのでこのまま電子と衝突させても衝突効率（ルミノシティといいます）が

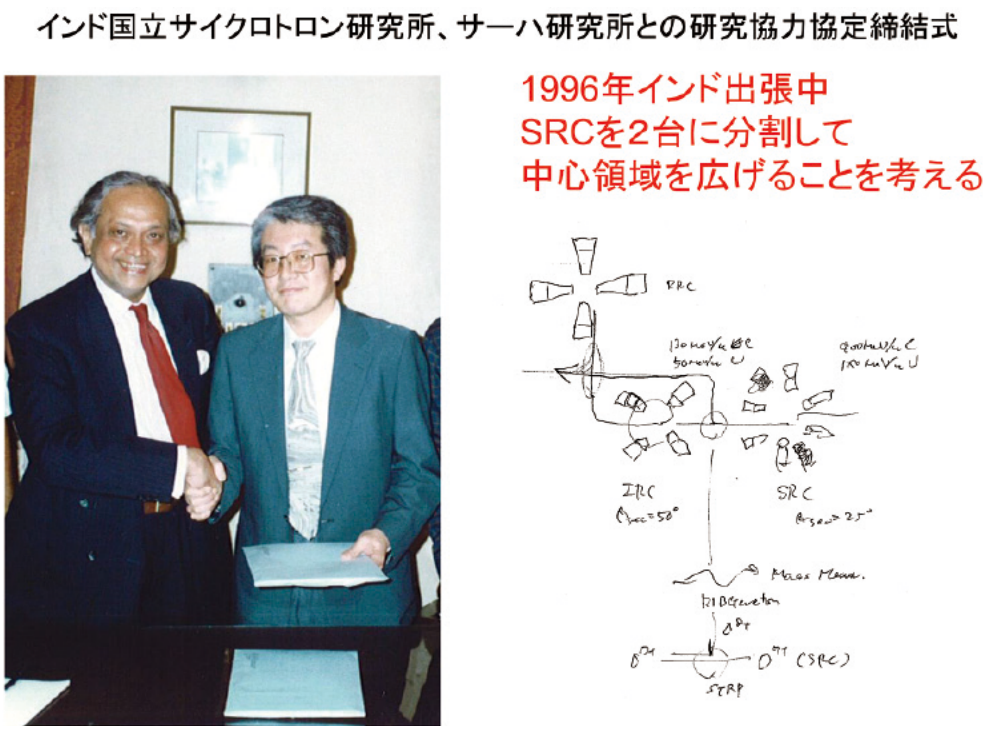



図 22：インド出張の写真と SRC 分割のメモ

悪い。それで、Accumulator Cooling Ring（ACR）で蓄積・冷却してエミッタンスを小さくし、次に Double Storage Ring（DSR）で電子加速リングから入射される高エネルギー電子ビームと衝突させるというものです。原理的にはこれでいいのですが、なんともいまひとつ釈然としないものになっています。まあ、とりあえずここから行こうかというわけです。

1995 年度に準備研究予算が認可されて、まずは超伝導リングサイクロトロンのモデルマグネットをつくってどこが難しいか試してみようということになります。その前にサイクロトロンのデザインで一番やっかいなのはビームの入射なので、入射軌道のシミュレーションを色々な方式を考案して試してみたわけです。結果は、入射装置の設計に無理がありすぎてどうも無理そうだということになってしまいました。何が大問題だったかと言うと、初期の超伝導リングサイクロトロン SRC の中心領域があまりにも狭すぎる。これはかなわんということになったわけです。SRC の設計はなるほど一筋縄ではいかないと皆で思った最初のことでした（図 21）。

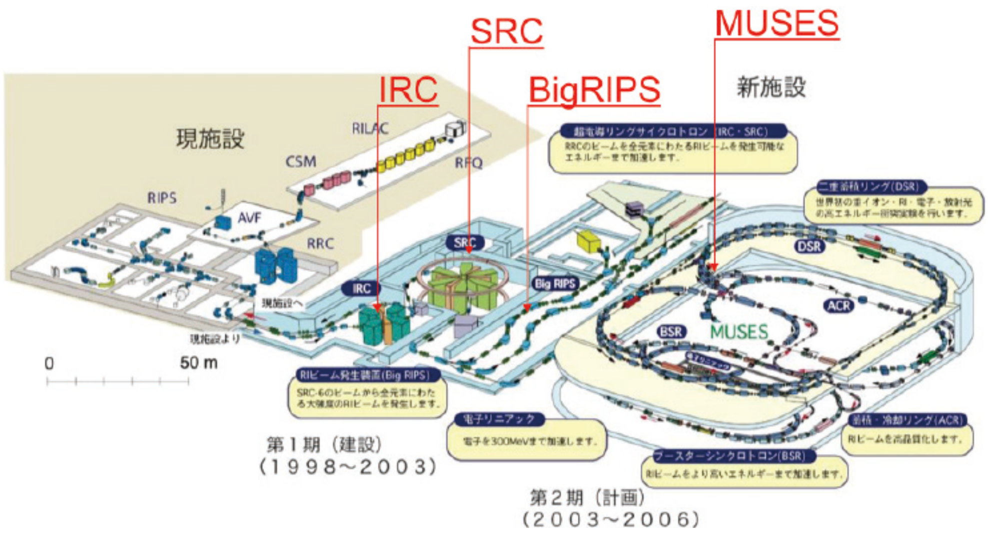



図 23：概算要求した RIBF

話は変わりますが、私は、RIBF の設計建設には現在の加速器チームでは人材が少なすぎると切実に思いまして、わが国を代表するほぼ全ての加速器メーカーの偉い方々に頼んで、ピカイチのデザイナーに出向してもらいました。このレポートの著者の何人かはそういう面々です。彼らと 10 年以上同じ釜の飯を食べることになります。

それで結局どうしたかというと—図 22 は 1996 年にカルカッタの VECC 研究所との協定締結後、B. Sinha 所長と所長室で握手をしている記念写真です—このときのインドへの飛行機のなかで、巨大な 1 台の SRC を 2 つに分ける。2 つに分ければ入射ができるっていうことに気がつきます。これはそのときのメモです。仁科先生のメモのようにきれいじゃありませんが、これで 2 つのサイクロトロンに分けようと決めたわけです。図のなかに、SRC を IRC と SRC に分割すれば、SRC の入射領域が広がって入射が可能になるばかりでなく、IRC と SRC の間でビームを二つに分ければ、新実験室と旧実験室での同時ビーム利用ができるようになるではないかと、まあ興奮いたしました。もともと旧実験室はどうなるのだろうと心配していましたので、一挙両得というわけです。建物も含めた総建設費もこの方が安いということが後でわかります。このアイデアはインドに着いてすぐ話しましたので、インドの友人の方が私のチームより早くアイデアを知ることになりました。

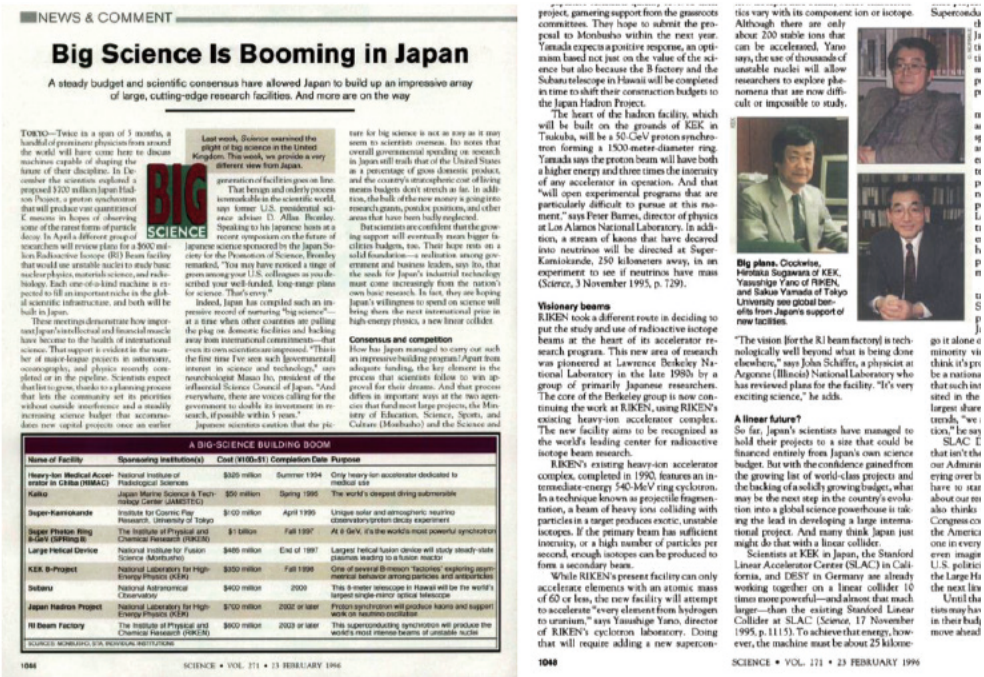
それで帰って来まして建設チームを全員集めて、今までの設計はなしにする—これからサイクロトロンを 2 台にする—ということで、最終的に図 23 のデザインで建設予算をも


図 24：RIBF 棟建設の歴史

らいに行こうということにしました。第 1 期で IRC、SRC、戻しビームライン、BigRIPS と RI ビーム実験装置、第 2 期で MUSES（Multi-Use Experimental Storage rings）ということです。総工費、何と 800 億円くらいの予算を要求したのですね。こんなデラックスなものを作るわけです—いろいろありまして最終的には約 500 億円になりました。

1996 年、橋本政権が発足しまして緊縮財政を敷きます。新規予算はすべて認めない、ということになりました。これは困ったことになったのですが、有馬理事長が「これはもう 2 年前からすでにやっているよ」「これは既にある計画で、新しいものではない」と主張され、結局、建設予算が認められました。私の手許に、当時の大蔵省主査の「この予算は、第 1 期だけを認めたものである」という念書があります。この念書をどのようにクリアするかが、難問として残ります。すなわち、第 1 期の中に MUSES 研究計画を取り込んでしまう方法はないかを考え出さなければならない、ということです。

RIBF 建設計画は科学技術庁の原子力委員会で評価を受けます。原子力委員会は原子力長期計画（長計）を策定し、これに従って計画実現の優先度を決めるので、この長計書の中にまずは記述される必要がありました。長計の中で、原研の大強度中性子ビーム施設



NEWS & COMMENT

# Big Science Is Booming in Japan

A steady budget and scientific consensus have allowed Japan to build up an impressive array of large, cutting-edge research facilities. And more are on the way

A BIG-SCIENCE BUILDING BOOM

| Name of Facility | Sponsoring Institution(s) | Cost (¥100=$1) | Completion Date | Purpose |
|---|---|---|---|---|
| Heavy-Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) | National Institute of Radiological Sciences | $325 million | Summer 1994 | Only heavy-ion accelerator dedicated to medical use |
| Kaiko | Japan Marine Science & Technology Center (JAMSTEC) | $50 million | Spring 1995 | The world's deepest diving submersible |
| Super-Kamiokande | Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo | $100 million | April 1996 | Unique solar and atmospheric neutrino observatory/proton decay experiment |
| Super Photon Ring 8-GeV (SPring 8) | The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN) | $1 billion | Fall 1997 | At 8 GeV, it's the world's most powerful synchrotron |
| Large Helical Device | National Institute for Fusion Science (Monbusho) | $485 million | End of 1997 | Largest helical fusion device will study steady-state plasmas leading to a fusion reactor |
| KEK B-Project | National Laboratory for High-Energy Physics (KEK) | $350 million | Fall 1998 | One of several B-meson "factories" exploring asymmetrical behavior among particles and antiparticles |
| Subaru | National Astronomical Observatory | $400 million | 2000 | This 8-meter telescope in Hawaii will be the world's largest single-mirror optical telescope |
| Japan Hadron Project | National Laboratory for High-Energy Physics (KEK) | $700 million | 2002 or later | Proton synchrotron will produce kaons and support work on neutrino oscillation |
| RI Beam Factory | The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN) | $600 million | 2003 or later | This superconducting synchrotron will produce the world's most intense beams of unstable nuclei |

SOURCES: MONBUSHO, STA, INDIVIDUAL INSTITUTIONS

1044 SCIENCE • VOL. 271 • 23 FEBRUARY 1996

1046 SCIENCE • VOL. 271 • 23 FEBRUARY 1996

図 25：SCIENCE Vol. 271, 23（1996）の記事

（後の J-PARC MLF）、大強度陽電子ビーム施設（実現されませんでした）と理研の RI ビームファクトリーが最終的に首尾よく記述されることになったのですね。RI ビームファクトリー建設計画は最終的に大臣折衝で認められましたが、後に役所からローマ字とカタカナの予算要求はいかがなものかとある議員からクレームがついた話を聞きました。

図 24 の航空写真は RIBF 棟建設の歴史です。右下の 99 年 7 月の写真に 4 号サイクロトロン棟が見えます。これを解体・撤去して RIBF 棟を建てることにしたわけです。RIBF 棟は図 23 の加速器・実験設備計画に従って一応設計しました。従って、2 階建ての MUSES を収容するようになっています。

4 号棟の右下に見える建物は、小学校の校舎なのですね。この校舎のすぐそばに世界有数の RI 発生装置を建設することになるので慎重でした。まず、わが国でもっとも放射線安全管理に詳しい外部の先生方に RIBF 棟放射線安全性検討委員会のメンバーになってもらい評価していただきました。評価は、まずは建築予定の建物は外部に向かっての放射線遮蔽能力が十分あるかです。もちろん建物内部で作業者が放射線被ばくをしないような安全対策が十分なされているかも評価されました。私には放射線安全の知識も経験もあまり

なかったので凄腕の部下たちにすべておまかせでしたが、当時もっとも科学的に妥当な手法で遮蔽能力を定量的に評価しているということで「安全」のお墨付きをもらいました。

これで私はすっかり自信をもちまして、放射線安全業務の部下と一緒に、和光市議会、地元自治会への RIBF 建設のお願いを丁寧にしてまわりました。それでいよいよ建設工事開始となりました。

最初の大事業は、放射化している 4 号サイクロトロンの除染、放射化物の永久保管、そしてモニュメントへの改造です。私の部下が孤軍奮闘しまして首尾よく立派なモニュメントにしてくれました。

建築工法は旧施設と同じです。20 m くらいの深さのところに岩盤と同じ硬さの厚い礫層がありまして、その上にコンクリート造りの建物の躯体を単に乗せるだけです。杭はまったく打っていません。

建物は加速器棟と実験棟に区分けして 2 期に分けて施工しました。2003 年に加速器棟が竣工したのがわかります。竣工後すぐに SRC の組み立てが始まりました。そして 2005 年 10 月に RIBF 棟の完成です。

図 25 は 1996 年 2 月号のサイエンス誌の記事です。Big Science Is Booming in Japan というタイトルで、日本の科学の大型計画が紹介されています。左下の表に、KEK-B project、Japan Hadron Project（後に J-PARC）、RI Beam Factory があります。右のページにそれぞれのプロジェクト・リーダーとして、菅原寛孝先生（元 KEK 所長）（左）、山田作衛先生（元東大原子核研究所所長）（右下）と私（右上）の写真が載っています。この記事では、RI Beam が“Visionary Beam”として紹介され、私へのインタヴューが記載されていますが、表のところで“superconducting synchrotron”と間違って紹介されています。この記事は実にタイムリーなので 1997 年度からの建設予算要求で活用しました。

図 23 の SRC をよく見ていただくと、図 26 の左の「旧デザイン」のようになっています。前に紹介しましたが、ミュンヘン工科大学、GANIL、MSU、JINR の超伝導リングサイクロトロンの設計はすべてこのように常伝導のリングサイクロトロンのセクター電磁石をただ超伝導化するという設計なのですね。私たちもここから出発しました。但し、セクター磁場を所期の仕様の 4.3 T まで発生させようとすると空間に漏えいする磁場が大きくなりすぎるので、これを巨大な超伝導ヘルムホルツコイルでアクティブにシールドしようという設計にしたわけです。こんな巨大な超伝導コイルをどこで製作するのか大問題でしたが、

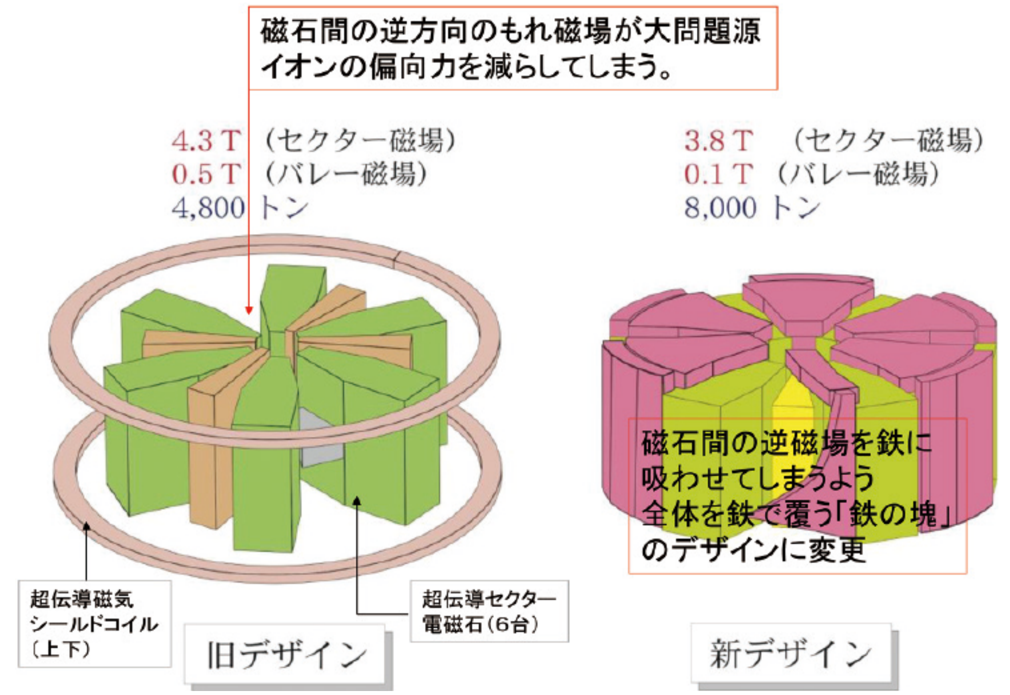



図 26：SRC の設計大変更（1）

問題の解決を先送りしました。

図 27 の右の挿絵の上側に、「旧デザイン」の超伝導メインコイルのポンチ絵があります。浸漬冷却といって、ステンレス製の容器に液体ヘリウムを満たしその中に超伝導コイルを漬けて転移温度約 10 K 以下に冷やす構造です。

超伝導線はアルミの母材の中心に NbTi 線をはめ込んだ構造で、何らかの原因で超伝導状態が破れたとき（クエンチ）すぐに大電流 5000 A をアルミの母材にバイパスして NbTi 線が焼損しないようにしてあります。これをアルミ安定化超伝導線といいます。従来は銅安定化が主流でしたが、私たちはアルミ安定化を世界で最初に採用しました。製作がし易く剛性（微量の不純物 Zn が混合していますが企業秘密だそうです）も十分で安価なところが魅力です。

メインコイルに掛かる甚大な拡張力をどう支えるかが大問題でした。「旧デザイン」では、コイル容器を鉄芯にとめつけて支えようということにしました。何となくこれで良いのではと思えますが、物量のある鉄芯も冷やさなければいけないので、冷却に数ヶ月という大変な時間がかかります。でもまあいいかということで、問題を先送りします。

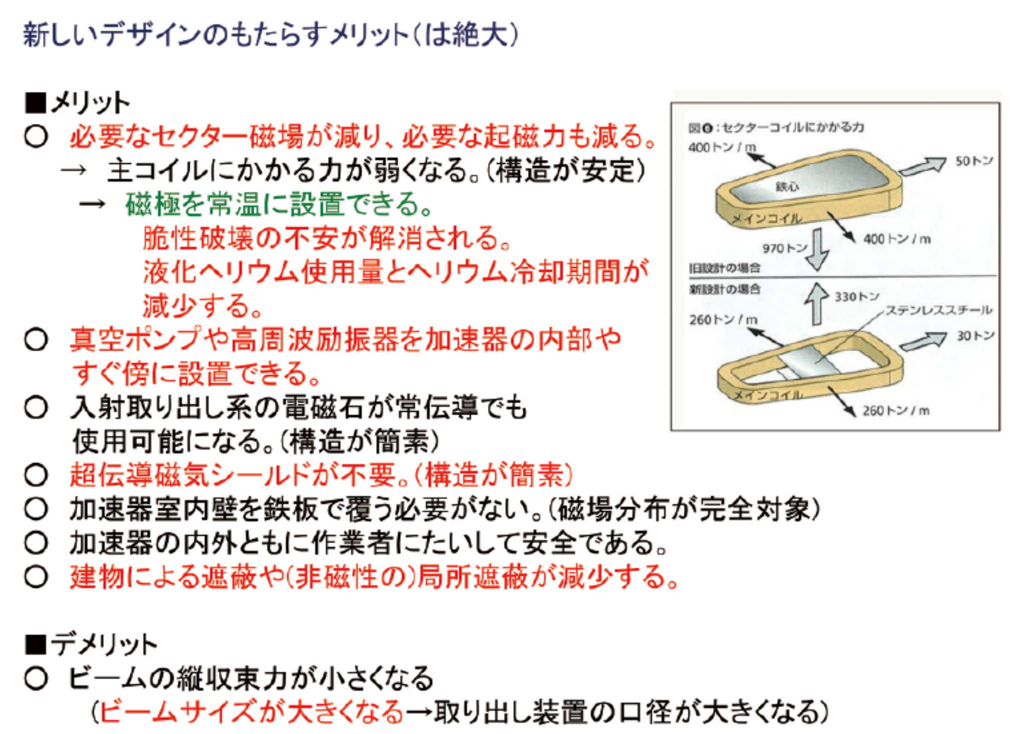



図 27：SRC の設計大変更（2）

「旧デザイン」でメーカーと契約し詳細設計が始まります。超伝導セクター電磁石を 1 台先行製作して仕様どおり動作するか工場で試すことにして 1 台分の鉄ヨークが工場で組みあがった頃です。私は一大決心をします。

図 27 に「新デザインのメリット」が列記してあります。このうちメリットとなっているところは「旧デザイン」では全部デメリットで、問題を全て先送りしていました。そのうち私は夜な夜な鉄芯が低温脆性で割れる悪夢を見るようになりました。このままでは、所期の仕様を下げると宣言するしかない、というところまで追い込まれました。そのとき或る晩、図 26 の設計大変更と図 27 の大変更のおぼろげなアイデアが同時に浮かびました—これが正解かも知れないと思うと居てもたってもいられなくなり、すぐにチームにこのアイデアを話しました— 1999 年 11 月 29 日の「可変フラッター型 SRC（従来方式との製造コストの比較）」という私のメモに鉄シールドの提案があり、1999 年 12 月 9 日の「矢野シールド付 SRC（常温ポール）」に転結板で主コイルの拡張力を支え、ポールを常温にできる構造の提案があります。案の定、皆さん大反対でした。しかしこのまま製作したら

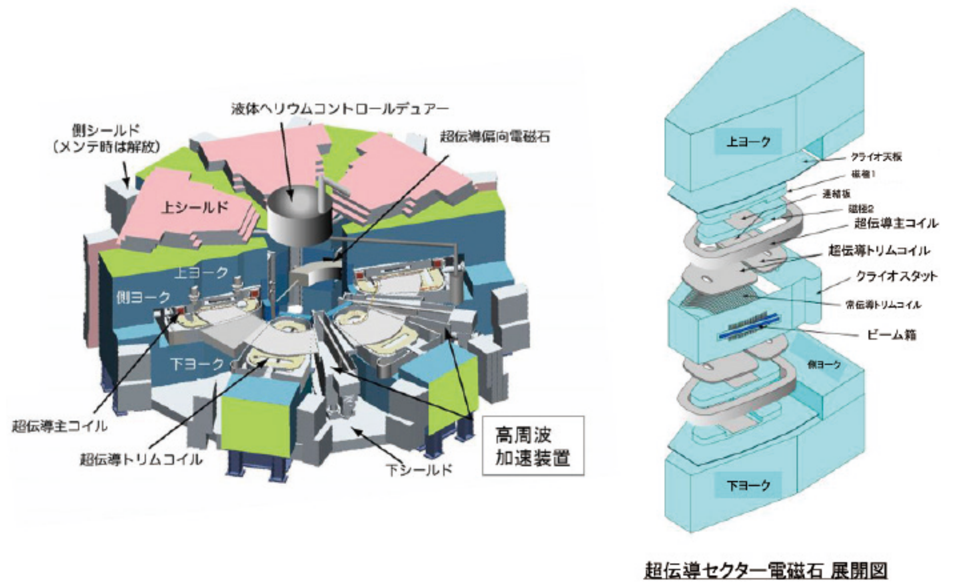



図 28：SRC の全体構造と超伝導セクター電磁石の展開図

我々は大失敗する—必死の思いでした。根負けした部下が少しずつでてきて、このアイデアで先送りしたすべての問題が果たして解決するのか、一から検討し直そうということになりました。

私はすぐにメーカーの偉い方に会って、契約している製作を全て停止して欲しい、但し、設計変更の案があるので、それを製作して欲しい、私の見積もりではその方が製作費は安く済むし何しろ構造が簡単で性能が良い—とまあ、無理難題をお願いしたわけです。答えは、いとも簡単に「いいでしょう。矢野さんにお任せします」でした。これで少し眠れるようになりました。

このアイデアのポイントは二つあります。

ひとつは、磁石間（バレーといいます）に発生する漏えい逆磁場を「新デザイン」のように鉄の磁気シールドに吸収して、イオンビームが走る領域への逆磁場を減らす。逆磁場が大きいと折角セクター磁場で中心に向かって曲げたにもかかわらず、バレーで曲げ戻されて全体としてイオンビームの曲げ力が大きくなりません。サイクロトロンの加速能力はこの全体の曲げ力できまりますので、この漏えい逆磁場をセクター磁場と関係なく減らす方法を考えないと加速能力を大きくできないという当たり前の問題がこれで解決します。漏えい磁場が減ったために、必要なセクター磁場も下がり、超伝導コイルに掛かる拡張力

も小さくなるわけです。もちろん超伝導磁気シールドは要りません。放射線の自己遮蔽構造なので、建物のコンクリートの壁厚が減り建築費が減りました。

ふたつ目は、常温の磁極に横穴をあけてステンレスの連結板を通し、この連結板で超伝導コイル容器の拡張力を支えるというものです。これができれば、低温脆性破壊の問題は解決し、冷却時間も相当に減ります。

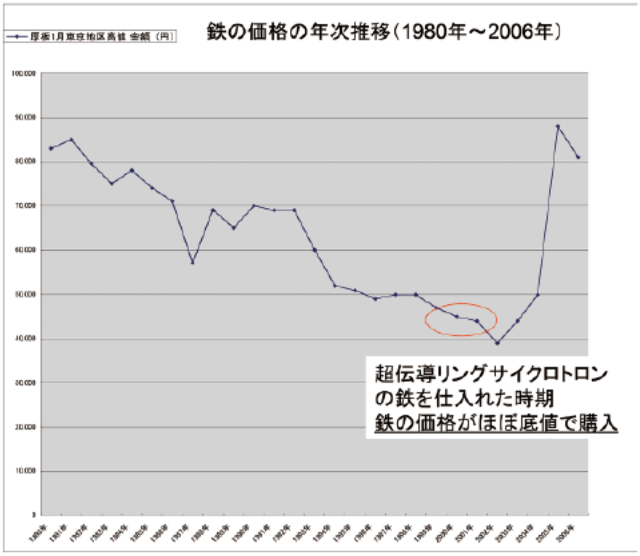



図 29：鉄の価格の年次推移

実はこの穴、等時性磁場をつくる超伝導トリムコイルの負荷を軽減するために必要であったことが分かります。最後の難問は、超伝導トリムコイルの構造でしたが、私の部下が間接冷却方式の構造を考えだしてくれまして解決しました。鉄シールドのおかげで必要な起磁力が下がったために、コイルの巻き数が相当減って大量に超伝導線が余ってしまいました。これを使ってトリムコイルを製作できることがわかりました。「これが正解だったか」と思った瞬間です。やっとよく眠れるようになったわけです。

こうやって最終的に図 28 のような構造にきまりました。製作をとめて 1 年半が過ぎていました。この概念設計に沿って詳細設計・製造となっていきます。

旧デザインで契約額は決まっていますが、部品点数が減り、構造が劇的に簡単になったために製作コストが減りましたが、鉄シールドのために約 4000 トンの純鉄を新たに調達する必要があります。

図 29 は、鉄の価格の 1980 年～ 2006 年の年次推移のデータです。これは普通の鉄の厚板の価格なので、純鉄の場合とそのまま同じではありませんが傾向は同じです。私たちが全部で約 8000 トンの純鉄を仕入れた時期はほぼ底値であったことがわかります。私は鉄の価格がどんどん下がってきていて「鉄は安い」と思っていましたが、後から大幸運であったことが分かりました。今では数倍になっています。

結局契約額は変えず仕様変更ということになりました。当然理研に責任がありますが、ペナルティーには至りませんでした。

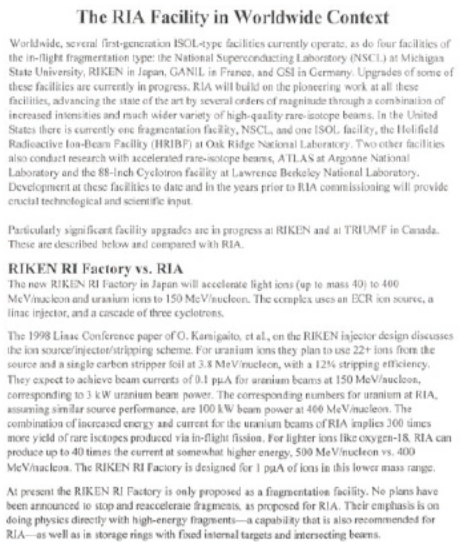
旧デザインで製作してしまった1台のヨークはどうしたのか—鉄を切り貼りして新デザインのように修正したので磁気特性が少し他の5台と違っています。この違いは、コイル電流の調整で補正できる範囲内であったので問題にはなりませんでした。見た目も違っていますが、いまでは「知る人ぞ知る」になっています。

私の決断が数か月遅れていたらと思うとぞっとします。

図30ですが、1999年、アメリカでRIBFの性能を凌ぐRIA計画（後にFRIBとなります）が提案され分厚い報告書が出版されます。その中でRIBFとの性能の違いを強調して「大強度RIビームを発生するには、核子あたり400 MeV（光速の70%）のウランビームが必要でRIAはそれを目指すが、RIBFは核子あたり150 MeVなので競争にならない。」といって右の図のようなRIビーム生成率の違いを提示します。これが本当なら、数倍から数十倍の生成率の違いとなってしまいます。

私はこのとき初めてウランの核分裂によるRIビーム発生率と核子あたり400 MeVの威力を知りました。「これはまいった。早くいってくれよ」となったわけです。

さて、どうしたか。部下の雑談からヒントを得ます。そして「そうかRRCとIRCの間に小型のサイクロトロンをもう1台（fRC）入れてIRCの前でスピードを上げてやれば、



**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 pμA 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 pμA 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.

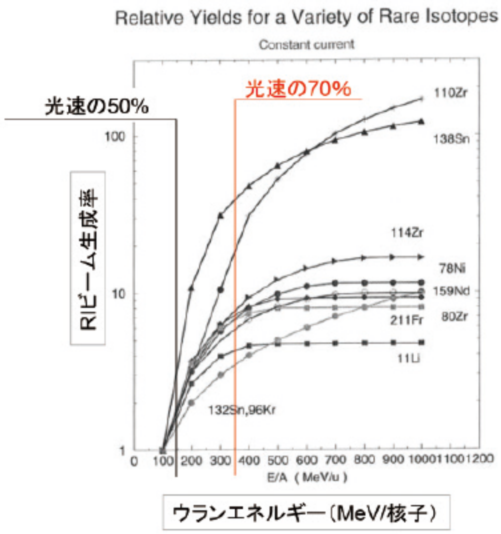



図30：1999年の米国RIA計画のレポート

製作中のIRCとSRCをこのままにしても、ウランビームのスピードを—400 MeVはSRCで発生する磁場の限界から無理でも—核子あたり350 MeVには行ける」ということに気づきます。

問題は予算です。fRCは年次建設計画書のなかにはもちろん書いてありせん。結論からいいますと、年次建設計画書のなかに書いてあった3台のCGSのうち1台は建設し2台を取りやめてその予算でfRC（予算書にはビーム入射効率増加装置としました。サイクロトロンとはいっていません）を導入させてほしいということです。理由は「RIAに負けてしまうから」です。この予算要求が最終的に認められます。

CGSの導入は理研ではそう簡単なものではありませんでした。私が理事会にRIBF計画を説明したとき「世界一の加速器施設を作るのは良いが、京都議定書も話題になっているおりに、電気を湯水のごとく使うのはいかがなものか、環境問題に留意せよ」と指摘を受けたのが事の始まりです。別の大問題がありました。東京電力と受電計画の打ち合わせを施設部と一緒に重ねていくうち、東京電力が「受電容量が大きすぎるので、現在の特高変電所を増強しなければならない」といってきたわけです。試算すると私たちの想定をはるかに上回る予算が必要なことが分かりました。困り果てていたとき、私の電気技術者の部下がCGSが有望だと知恵をくれます。部下の話にのって、複数台のCGSで自家発電すればどうかと検討してみたところこちらの方が建設費は安いし環境にも良いという結論になります（火力の発電効率が約40%に対してCGSは約60%もあります）。このCGS導入案に施設部が大反対をします。だいたいそんなものが安定に動くのか—というわけです。施設部との関係が悪くなって埒があかないので施設担当理事に「CGSを加速器の一部として導入させてほしい」とお願いにあがります。理事には「加速器が導入して運転も加速器がするのであれば導入を認める」と中庸なご判定をいただきました。それで概算要求にCGSの建設がもりこまれましたわけです。CGSの中央操作室は加速器の制御室の隣につくりました。

fRCとCGSがどういう関係があるかといいますと、CGSは加速器の一部なので、これをどうしようと施設部とは関係がないということになり、先ほどのような予算の組み替えが可能になったわけです。

これでウランを核子あたり345 MeVまで加速できるようになった（なぜ350 MeVでないかといいますと、350 MeVのときの周波数ではfRCの共振器に寄生振動がのることがわかり、これを避けるため少し下げて345 MeVにしました）わけですが、もう一つ問題

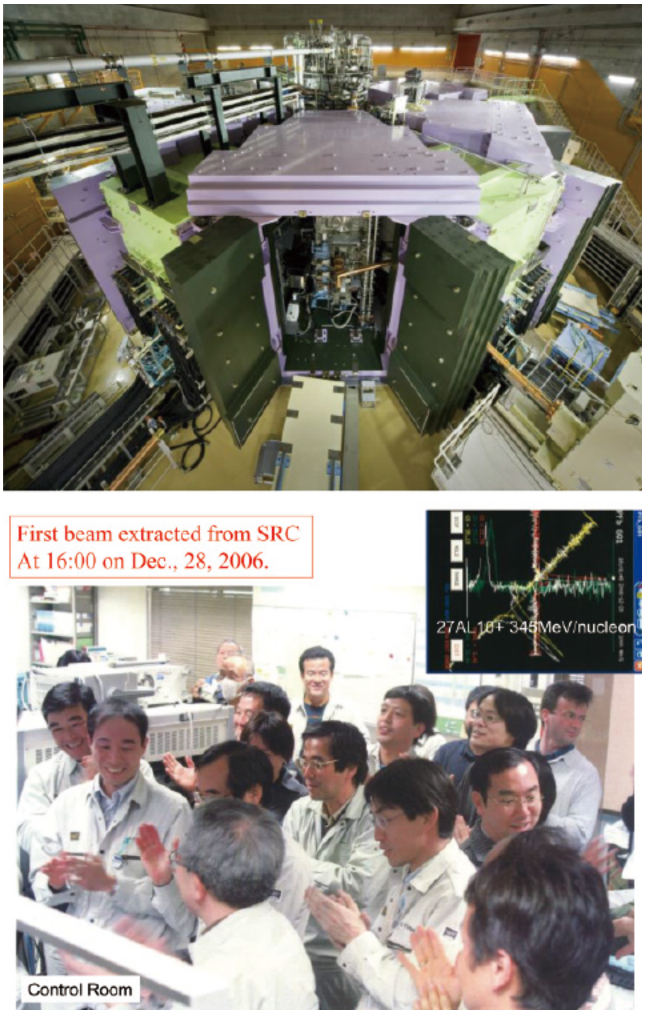



図 31：（上）鉄シールドの観音扉を開けた SRC 中に共振器が見える。右下は励振器（下）SRC からのファーストビーム引き出しに成功した瞬間にコントロール室で沸きあがる面々

がありました。

　ウランの核分裂で発生した RI ビームのエミッタンスは入射核破砕反応で発生した RI ビームのエミッタンスより格段に悪いということです。これは二つの大きな質量の核に分裂するとき互いに反跳するためです。図 23 の BigRIPS は 2 本になっていますが、これは入射核破砕反応で同時に 2 種類の RI ビームを作って使おうとしたからです。エミッタンスが悪いということは、非常に大きな口径の四重極電磁石が必要ということになり、必然的に超伝導四重極電磁石となります。口径の小さな常伝導 2 本か、口径の大きな超伝導 1 本か、核物理学者の間で激論がありました。予算は決まっていますので、超伝導 2 本はありえません。結局私の決断で超伝導にしました。決断は正しかったと思います。

　図 31 は総重量約 8300 トン、サイクロトロン史上最強の曲げ力 8 Tm の SRC の雄姿と、SRC からファーストビームを引き出した瞬間の加速器コントロール室の様子です。私は国際会議で RIBF 建設の進捗状況を発表するたびに「私たちは RRC からファーストビームを引き出した 1986 年 12 月 16 日 15 時 34 分のキッカリ 20 年後に SRC からファースト

GSI
GESELLSCHAFT FÜR SCHWERIONENFORSCHUNG

Section 2

*Table 1.10: Number of ions per bunch and luminosity of the eA-Collider for several reference nuclei. Production cross sections, separation efficiency and space-charge limits for stored beams are included.*

| Nucleus | Number of ions/bunch | Luminosity,$cm^{-2}s^{-1}$ |
|---|---|---|
| $^{238}U^{92+}$ | $0.9\times10^{7}$ | $1.0\times10^{28}$ |
| $^{56}Ni^{28+}$ | $2.8\times10^{7}$ | $3.3\times10^{28}$ |
| $^{69}Ni^{28+}$ | $2.8\times10^{7}$ | $2.4\times10^{28}$ |
| $^{71}Ni^{28+}$ | $6.6\times10^{6}$ | $1.1\times10^{27}$ |
| $^{104}Sn^{50+}$ | $6.0\times10^{5}$ | $7.0\times10^{26}$ |
| $^{132}Sn^{50+}$ | $1.6\times10^{7}$ | $1.8\times10^{28}$ |
| $^{133}Sn^{50+}$ | $2.1\times10^{6}$ | $1.8\times10^{26}$ |

**The luminosities are highly favorable when compared with the MUSES project at RIKEN, Japan. The GSI project, based on pulsed beams, is optimized for storage-ring operation whereas the RIKEN project relies on intense DC beams.**

NOVEMBER 2001

図 32：GSI のレポート

ビームを引き出す」と宣言してきました。12 日ほど遅れましたが、2006 年 12 月 28 日 16 時 00 分に成功しました。理研はこの日の 17 時 20 分に御用納めで、ぎりぎり成功です。20 時から記者会見を予定していましたのでホッとしました。大新聞各社が翌朝大きく報道してくれました。さすがに涙をこらえることができませんでしたね。そして翌年 6 月に国際会議（図 12）でのデビューとなります。

さて、MUSES はどうなったかを話します。2003 年、私は MUSES をとりやめ、代わりに私たちの発明した方式での RI と電子ビームの散乱装置（図 4 の e-RI scattering with SCRIT）と、同じく私たちの発明した RI の精密質量測定装置（図 4 の Rare RI ring）を建設するという決断をしました。この方が MUSES より格段に建設費が安いからです。これで、第 1 期のなかに第 2 期を取り込むことになります。

これにもきっかけがあります。

図 32 は 2001 年の GSI の将来計画書で RIBF の MUSES についての記述です。「GSI の電子とイオン衝突器 eA-Collider はパルスビーム入射であるので衝突効率が良いが、MUSES は DC（連続）ビーム入射なので衝突効率が悪い」とあります。このまま

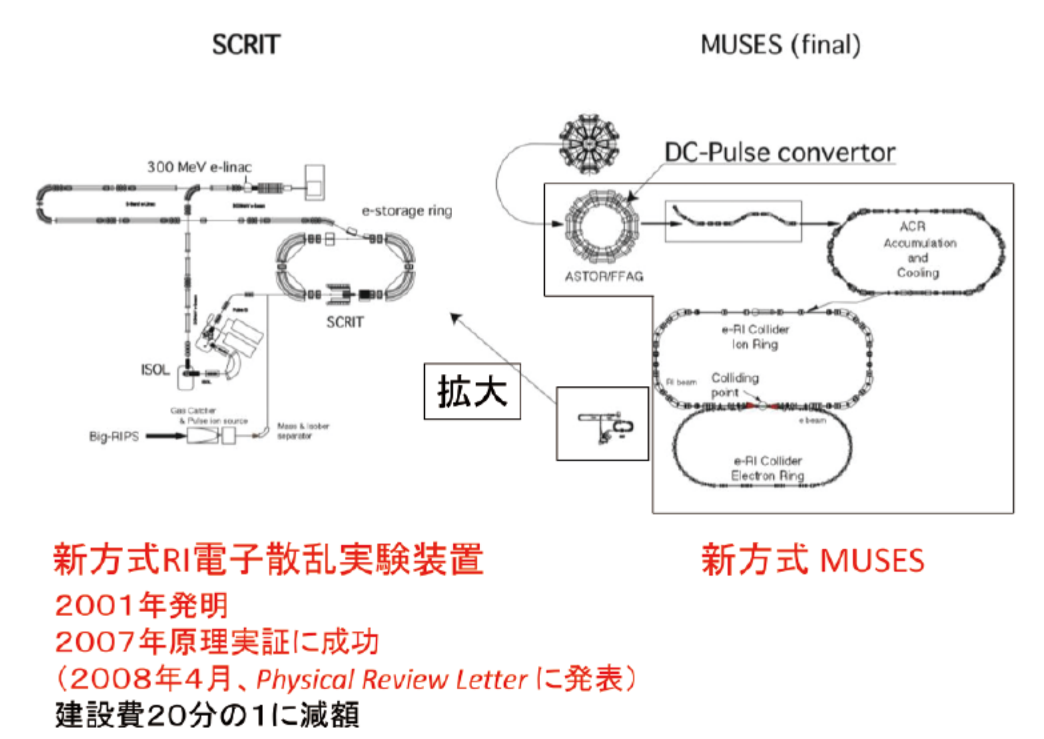



図 33：MUSES と新方式の大きさの比較

MUSES を作ると GSI にはかなわないことになります。私たちもこのことは当然気にしていました。そこで図 33 のような MUSES を考えたわけです。

図 33 の右側は MUSES の展開図ですが、ASTOR/FFAG なる DC-Pulse convertor を加えてあります。SRC の DC（連続）ビームをこれに入射し時間的に圧縮してピーク電流の大きなパルスビームに変換し、新たな BigRIPS でパルス RI ビームを生成し、これを MUSES に入射するという方式を考えたわけです。これがうまくいけば GSI の性能を凌げます。ASTOR/FFAG というのは、サイクロトロンなのですが、適当な半径のところで加速電圧をゼロにします。するとそこでターンが稠密になります。これをシンクロトロン加速電場でさらに加速しキッカーで蹴りだすと DC がパルスになるという仕掛けでして私たちの発明です。シミュレーションの結果は良好で、うまくいきそうだとなって「大魔神」という名前をつけました。図 4 の実験室右側に SHARAQ という東大の実験装置がありますが、この BF2 の部屋は巨大な大魔神を収容するように設計されていまして、その上の BF1 に MUSES を収容し BF2 から BF1 に向けて斜めに新 BigRIPS を設置できるように建物は作ってあります、というか、作ってしまいました。

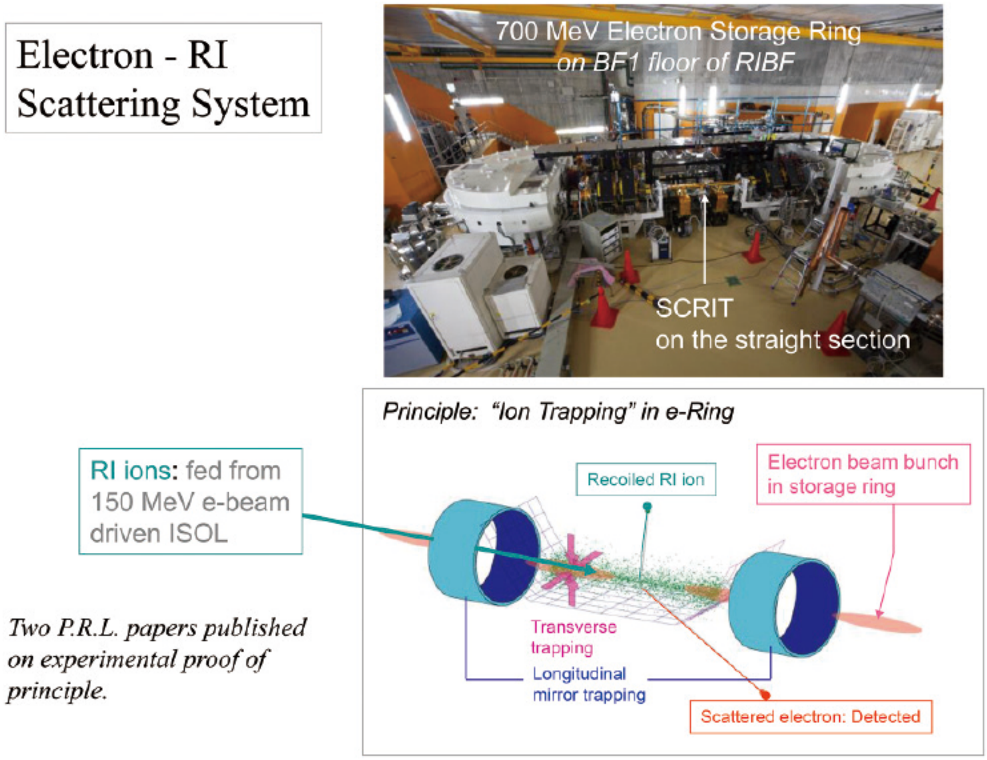



図 34：SCRIT の原理と電子 RI 散乱実験装置

大問題は、予算です。巨額の大魔神がないと MUSES を作る意味がないというところまで追い込まれたとき、アイデアが湧きます。Self-Confining RI Target（SCRIT）「自己閉じ込め型 RI 標的」方式による不安定核（RI）電子散乱実験装置（左の図）で私たちの発明です。

MUSES と大きさを比較すると拡大前の大きさになります（図 33）。建設費は約 20 分の 1 ですむことになりました。

図 34 に原理図があります。この発明に考え至った物理現象と同じものに放射光源の電子蓄積リングで起きるイオントラッピングというやっかいな現象があります。周回する電子ビームがリング中の残留ガスを電離して軌道上にイオンのさやを作り、電子ビームがイオンを引き付けて周回電子ビームが不安定になる現象です。これがあると放射光の輝度が悪くなるので、いろいろな対策がとられています。実は、私もこの SCRIT というアイデアを実現させた私の部下も最初この知識をもっていませんでした。私たちのアイデアはこ

のやっかいな現象を逆に利用したわけです。

新方式ですがこうなっています。電子ビームの制動放射でガンマ線を発生させこれでウランを照射して RI を作ります。RI の中から実験に使う RI（電荷は 1 価です）を分離して少し加速し、電子蓄積リングの電子ビーム軌道上に入射し、前後に静電場の壁を立てます。そうすると RI は前後にはこの電場で、横方向には電子ビームでトラップされ、RI による電子散乱がおこります。この散乱を測れば不安定核（RI）の電荷分布が正確に測れるということで、京大化学研究所の電子リングを使わせてもらって原理実証実験をやった結果、見事に成功しました。

図 34 の写真の装置が MUSES を収容する予定だった部屋の片隅に組みあがり、最終調整に入っています。2015 年中には世界初の e-RI 散乱実験データが出る予定です。

建設費が激減したとはいえ、まだ相当な予算が必要です。

幸運がありました。写真に写っている 700 MeV の電子蓄積リングと入射器の 150 MeV のマイクロトロンをただでもらってきたのです。原理実証はできたけれど概算要求できる予算では少なすぎする。どうしようと思いあぐねていたころ、大先輩の住友関連の偉い方と会食する機会があって、そのとき先輩から「住友重機は君もよく知っている半導体製造用放射光源のオーロラを廃棄処分するそうだ」という話を聞きまして、すわと、住友重機の偉い方にお会いして、オーロラをくださいとお願いしたのですね。答えは「よろしいです。差し上げます。但し、移設はすべてそちらでお願いします」ということでした。

このオーロラを改造したものが、写真の装置です。

図 35：Rare RI ring 全景

さて、MUSES のもうひとつの目的は、RI の質量の精密測定です。MUSES での質量測定方式は、GSI と同じですから、これも GSI にかないません。

私と後藤さんと加速器と実験グループの若手で GSI に対抗できる新方式をひねりだしました。Rare RI ring というものです。こ

れはどういう方式かというと、BigRIPSで生成したRIを1粒子だけキッカーで蓄積リングに入射し、1000回くらい周回させて取り出し、入射時間と取り出し時間の差から飛行時間を測定します。これを質量が精密にわかっている粒子と比べて質量を100万分の1のオーダーで求めるというものです。蓄積リングは等時性になっていなければならないので、加速しないサイクロトロンといえます。私と後藤さんはサイクロトロンには精通していますから、この方式の質量測定式は私と後藤さんが導出しました。

GSIとの性能比較はどうか。GSI方式では寿命の非常に短い不安定核の質量を求めることができません。これは、冷却に時間がかかりすぎるからです。私たちの方式ではこの制限がありません。性能比較はいわずもがなですが、性能試験は2016年なのでそれまでは良くわかりません。

図35はこの装置の写真です。実は、このリング、もとは原子核研究所で昔、平尾先生が主導されて重イオンの蓄積と冷却方式の開発研究に使っていたTARN Ⅱです。KEKに眠っているのに気づいてもらってきました。もちろん大改造費がかかりましたが、一から作るとすると概算要求できる予算内では実現できませんでしたので、幸運でした。

こうしてMUSESを第1期の予算計画の中にとりこみ、所期の研究ができる実験装置をすべて完成させることに成功したわけです。着工してから17年かかりました。

2014年6月に東大でThe 2nd Conference on Advances in Radioactive Isotope Science（ARIS2014）という原子核の国際会議がありまして、組織委員会から会議最初の基調講演に来るように要請されて行ってみました。基調講演の最後のところで講演者のR. Janssensアルゴンヌ国立研究所教授が私に起立するようにうながすので、起立すると会場から核物理学者の大拍手を受けました。会議では多くの欧米の核物理学者がRIBFのレイアウト図を見せながら最近の成果を発表していました。RIBFは世界の核物理学者を魅了しているようでした。

建設に着手したころは、無謀なSRC、不毛なMUSESと頭を抱える日々もありましたが、意気に感ずる先輩と同僚、後輩たちの総力戦で、盤石なるSRC、豊穣なるRIBFが実現したようです。

司会　矢野先生、どうもありがとうございました。加速器をつくるいろんな苦労話を聞かせていただきました。

それでは、分子イメージングによる核医学診断というテーマで、放射線医学総合研究所理事長の米倉先生にお話をうかがいます。米倉先生は、長年、分子イメージングに関して研究されてきまして、福井大学やの分子イメージングセンターのセンター長でもいらっしゃいます。また現在、放医研で分子イメージングのプロジェクトを立ち上げ推進しておられます。ラジオアイソトープが分子イメージングとしてどのように核医学診断に利用されているのか、最新の情報をお話しいただきます。それでは米倉先生、よろしくお願いいたします。

## 「分子イメージングによる核医学診断」

米倉 義晴（放射線医学総合研究所理事長）

ご紹介、有難うございました。米倉でございます。今日はとても楽しい話を聞かせていただきました。小学校から中学、あるいは高校にかけては、私も科学少年でして、できればこういう物理の研究をやりたいなと思いながら、ちょっと道を間違って、医学の方に行ってしまいました。仁科先生のお名前は子供のころからよく存じ上げております。私は関西の出身ですので、ノーベル賞をとられた湯川先生のお話など、子供のころに非常にわくわくしたことを、一から勉強させていただいて、楽しい思いをさせていただいています。

今日は、アイソトープが医学にどういうふうに使われているかっていう話をさせていただきたいと思います。分子イメージングによる核医学診断というタイトルを井戸先生の方からいただきました。分子イメージングという言葉は、まだ生まれたばかりのような言葉ですので、これからどのように進んでいくのか、ある意味では非常に夢のある話だと思っておりますが、まだまだ、そういった夢のデータを持っているわけじゃありませんので、どういった考え方で、こういう分野が進んできたのかということをお話ししたいと思います。

最初に簡単に、我々の考えている核医学っていう言葉を少しご紹介したいと思います。先ほどまでお聞きしたのは、いろんな核種を作るような、そういう物理学のお話でしたけども、これを医学に応用するのが、核医学であります。２番目の話題として、現在行われている、さまざまな診断法についてお話しします。PET（Positron Emission Tomography）

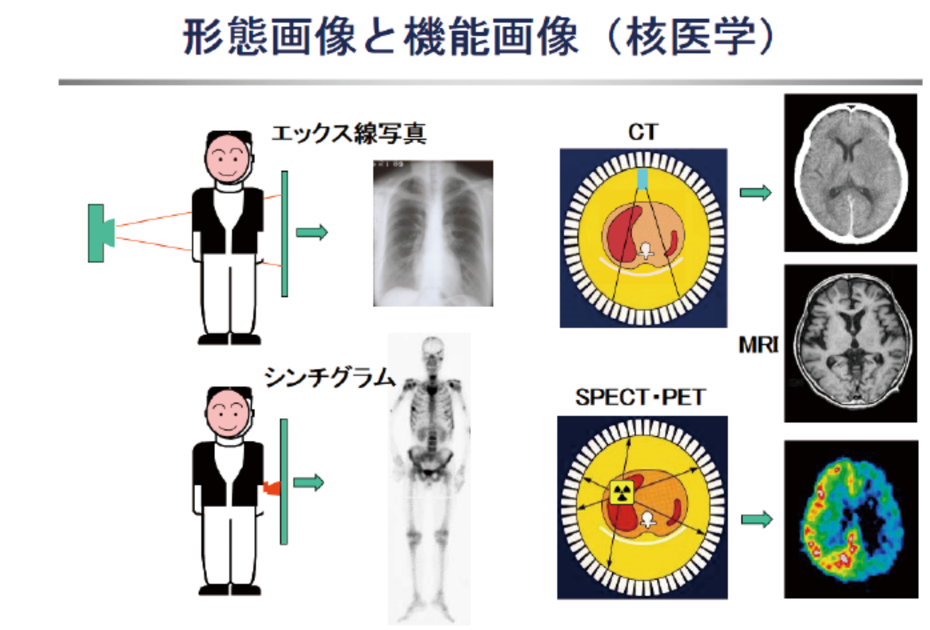



図 1

と呼ばれる診断法があります。これは先ほどの話にもありました陽電子（positron）が出るような核種を使うのですが、これを使ったガン診断法の開発の歴史についてお話します。これには、今日、司会をしていただいている井戸先生も非常に大きな貢献をされております。この辺りについてお話をして、そして最後に時間がありましたら、新しい分子イメージングを使った機能診断法の応用についてお話ししたいと思います。

最初に医学関係の方はあまり多くないと思いますので、まず医療の分野で画像がどのように使われているのかを、大きく 2 つに分けてみました（図 1)。形を見る形態画像と機能を見る画像があります。体のなかで起こっているさまざまな現象をこれらの方法を駆使して見ることができます。そのなかで、核医学と呼ばれる分野は、体のなかで起こっているさまざまな臓器の働き、すなわち機能を診断する分野と考えていただければよいと思います。

画像のなかで最もよく使われているのは、皆さんご存じのエックス線写真です。胸のエックス線写真をよく撮りますが、これはエックス線という放射線を照射して体のなかを通過してくるその情報を写真として撮ることによって、体の内部の形—そこにおける電子密度でありますけども—これを画像化することになります。一方、核医学というのは、体の

なかにアイソトープを投与して、そのアイソトープから出てくる放射線を外側に置いたカメラで撮るという形になります。例えば同じように体の輪郭が見えるような画像が撮れますが、この2つの画像の間には非常に大きな違いがあります。エックス線写真の方は、放射線が通過してきた組織の密度の情報が画像化されていますし、シンチグラムの核医学の方では、体のなかに集まったアイソトープの分布を見ることになります。これによって体の機能を見るわけです。例えば下段中央の画像は、骨に集まる性質をもった薬剤を使って、活発な骨の代謝が行われているようなところ、例えば、ガンの転移層などでは黒くなって見えるわけです。

こういった診断法が大きな変革を遂げたのは、1970年代の初め頃からです。皆さんご存知のCT（Computed Tomography）という断層画像撮像法の発明が大きな影響を与えました。それまでは、エックス線を体の一方向に当てて反対側のフィルムで撮像していたのを、エックス線源と体の反対側の検出器を一緒に体の回りにぐるりと回すことによって断層写真が撮れるわけです。まるで体のなかを輪切りにしたような形の断層画像が撮れるようになりました。このCTと同じ原理を用いて、体内のアイソトープの断層画像を撮るのが、SPECT（Single Photon Emission CT）とか、PET（Positron Emission Tomography）と呼ばれる新しい診断法であります。1972年にハウンスフィールドG. Hounsfield（1979年ノーベル生理学・医学賞）によって、CTの原理が公表されて、その数年後には、これらのアイソトープの断層画像ができるようになりました。右上と右下の2つの画像は、見かけは同じように輪切りの、頭のなかの画像なのですが、CTで見えているのはあくまで頭蓋骨のなかにある脳のエックス線の吸収度の画像です。一方、右下は、脳の血流量で、脳のなかにどれだけの血液が流れ込んでいるかを示す画像です。同じような断層画像でありながら、形と機能という大きな違いがあります。MRI（Magnetic Resonance Imaging）と呼ばれる、放射線を使わない診断法があるのも、よくご存じだと思いますが、これも断層画像の1つです（図右中央)。これも、基本的には形態画像ですが、MRIの場合には機能情報も得られるということで最近注目されているのはご存じのとおりです。

では核医学画像を実際に我々が手にするには何が必要かと言いますと（図2)、従来のエックス線やMRIなどの画像とは異なって、診断機器だけではなくて、体のなかに投与する薬剤の開発が非常に重要になります。「体のなかのどのような働きを見るのか？」に応じた薬剤をつくる必要があります。これが放射性医薬品と呼ばれるものです。これを体のなかに投与してその分布をカメラで撮ると、例えば脳のなかでどういった現象が起こっ

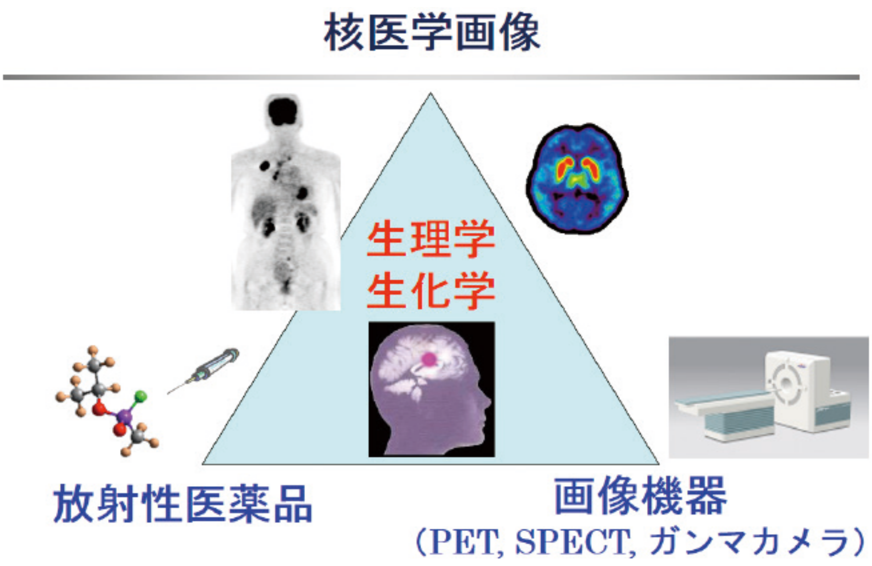



図 2

ているのか、体のなかでどういったことが起こっているのかという、まさに体の持っている生理学、あるいは生化学的な情報を画像化することができます。

このような画像医学の展開（図 3）は、1895 年にレントゲン W. Roentgen 博士によって発見されたエックス線によって、体のなかを素通しにして見ることができるようになったのが始まりです。先ほどお話をしましたような、CT の発明によって輪切りの断層画像として撮れることができるようになりました。そしてその延長上として、アイソトープの分布を断層画像として撮ることによって、さまざまな体のなかの働きの断層画像を撮ることができるようになってきたわけです。これがまさに、今まで我々が進めてきた画像医学の発展でした。

20 世紀の後半になって、1950 年以降に分子生物学のめざましい発展が起こってまいります。ご存じのようにヒトゲノムの解析が終了して、すべてのゲノム配列が分かるようになりました。分子生物学の重大なテーマは、図右上のゲノムで得られた情報からどのようにして実際に体のなかでタンパクがつくられ、そしてそのタンパクがどのように体の機能をつかさどっているかを調べようとしているわけです。この両者を結ぶものが、分子イメージングで、現在注目されています。すなわち、分子生物学で得られるような情報を、画像として体のなかで見るというのが分子イメージングの考え方です。体のなかで起ってい

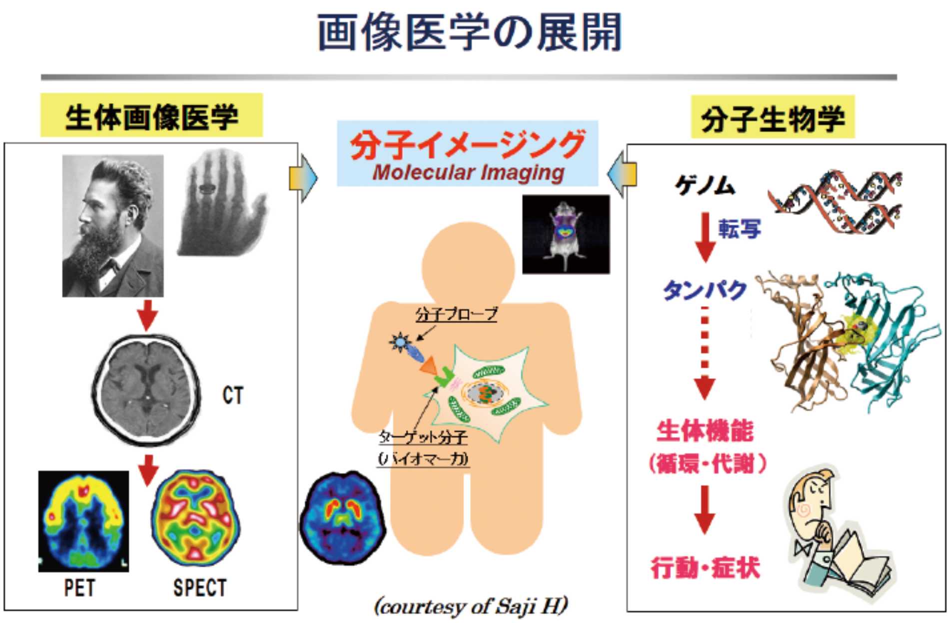



図 3（京都大学佐治教授の提供による）

る様々な分子現象に特異的に結合させるような分子プローブと呼ばれる薬剤を体に投与して、その結合した状態を外から画像として撮ることによって、例えば、脳のなかにごくわずかに存在するタンパク質、あるいはマウスやラットのような小さな動物における分子レベルの現象を画像化するというのが、分子イメージングの特徴です。

一言で言いますと、分子イメージングは（図 4）、生体内における様々な分子が関与する事象を、画像として可視化する技術と言えます。実際には、分子レベルの異常に基づくさまざまな病気の診断、あるいは治療法の開発への貢献が期待されています。そのなかでも、とりわけ核医学診断法は、臓器の機能診断、つまり働きを見るような診断に非常に有用であり、この分子イメージング技術を導入することによって、新たな発展が期待されています。

少し物理的なお話に戻りますが、もっとも注目されているのが、陽電子（ポジトロン）を使った断層画像です（図 5）。ポジトロン断層画像、あるいは PET と呼ばれています。ここで使われる陽電子は、電子の反物質です。普通の電子はマイナスの電荷を持っていますので、その反対にプラスの電荷を持っている電子（陽電子）は、どこから出てくるのでしょうか？

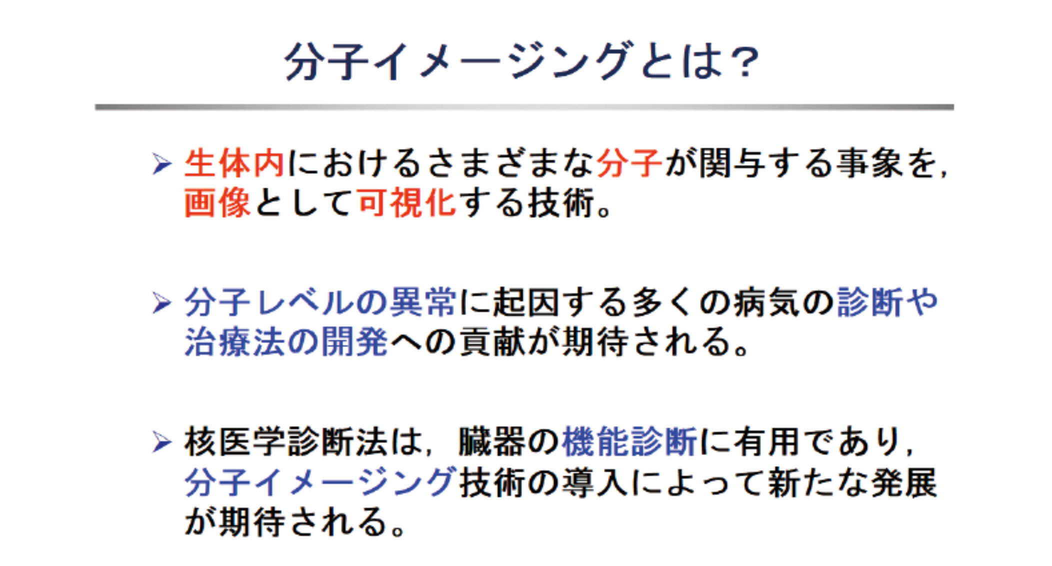



図 4

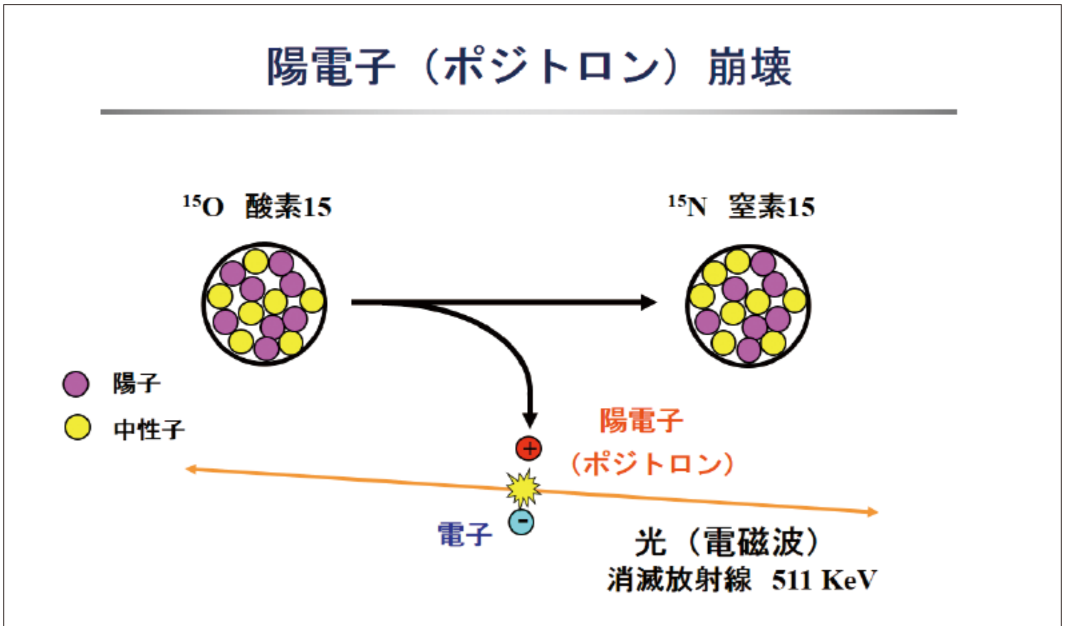



図 5

先ほど話がありましたが、原子核は陽子と中性子からできています。そのなかで、中性子に比べて陽子の方の数が少し多い、逆に言いますと中性子が少ないような核種があります。例えば、私たちのまわりにある酸素の 16 は、陽子が 8 個と中性子が 8 個からできています。これよりも中性子が 1 つ少ない酸素の 15 という同位元素があります。このアイ

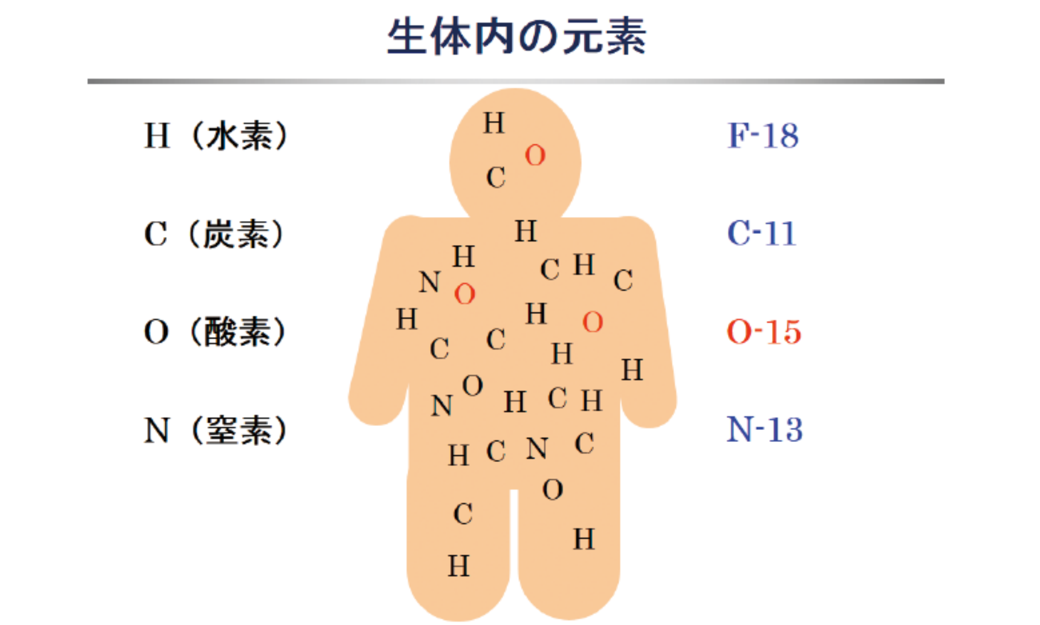



図 6

ソトープは、非常に不安定でして、半減期 2 分でもって、このうちの陽子が中性子に変わっていきます。そのときに、陽電子が 1 つ飛び出してきます。飛び出した陽電子が―この世界では反物質と呼ばれるものですので―直ちに周りにある電子と結合して消滅する。そのときに消滅する質量に見合うだけのエネルギー（511keV）をもった 2 本の消滅放射線（ガンマ線）が互いに反対方向に体の外に出てくるので、これを対向する 2 つのガンマ線検出器で捉えて先ほどのような画像を得ることができるわけです。

私たちの体の大部分は、水素 H、炭素 C、酸素 O、窒素 N といった元素で、ほぼ大部分が占められています（図 6）。これに対して、体のなかの分子情報を得ようと思うと、ポジトロン放出核種が役に立ってきます。普通の炭素は質量が 12 ですが、それよりも 1 つ質量の少ない炭素の C-11、あるいは同様に酸素の O-15、窒素の N-13 などのポジトロン核種を使いますと、体のなかでの挙動を見ることができるわけです。水素に関しましては、残念ながらこれを外から検出する術はありませんけれども、代わりにフッ素の F-18 を入れることが可能です。

先ほどお話しました O-15 は、実際に肺から体のなかに入って脳で使われているわけですので、O-15 というポジトロン核種をトレーサーとして、肺から吸ってもらって脳への

| ポジトロン核種 | | 半減期 | 標識化合物の例 |
|---|---|---|---|
| $^{11}C$ | （炭素11） | 20 分 | 酢酸，脂肪酸，薬剤 |
| $^{13}N$ | （窒素13） | 10 分 | $N_2$，$NH_3$，アミノ酸 |
| $^{15}O$ | （酸素15） | 2 分 | $O_2$，$CO_2$，$H_2O$ |
| $^{18}F$ | （フッ素18） | 110 分 | FDG（ブドウ糖）<br>F-DOPA（神経伝達）<br>核酸，FES（内分泌） |

図 7

集積の具合を見ると、脳のなかでどれくらいの酸素が使われているのかを画像化することができます。これは古典的な手法なのですが、分子イメージングの基本的な考え方の基になったものだと思います。この検査法は、実は 1980 年代前後に確立された比較的古い検査法ですが、分子イメージングの出発点であると言えるかもしれません。

今、お話をしたようなポジトロン核種（図 7）は、先ほど言いましたように、炭素、窒素、酸素、フッ素といった、比較的原子番号の小さなアイソトープが使われています。ただ、これらの核種はいずれも寿命が非常に短いというのが最大の問題です。先ほども話をした O-15 は半減期が 2 分しかありません。2 分で半分になっていきますので、一度、つくっておいたものを使うということができません。どうするかと言うと、常にサイクロトロンを使って O-15 を作りながら、それを片方で患者さんに吸入していただいて、そして画像を撮ることになります。すなわち、製造と投与を同時並行で行う必要があります。それ以外の核種は、さまざま化合物の合成に使われますけども、寿命が短いために、これらの薬剤を手際よく製造することが必要になってまいります。唯一、このフッ素 18 だけは、110 分つまり約 2 時間の半減期です。そうしますと、比較的離れたところまで送ることができますので、現在、唯一、このフッ素を使った薬剤だけが日本国内での医療機関に販売されている化合物です。

## PETによるがん診断法の開発

1930　サイクロトロン加速器の建設（E.O. Laurence）
1930　腫瘍細胞の特異的代謝（O. Warburg）
1932　陽電子（ポジトロン）の発見（C.D. Anderson）

1975　PETスキャナー（M.M. Ter-Pogossian）
1976　F-18 FDGの合成（T. Ido）
1979　F-18 FDGによる脳糖代謝測定（M. Phelps）
1982　大腸がん肝転移のPET画像（Y. Yonekura）

2002　F-18 FDG検査　保険適用

図 8

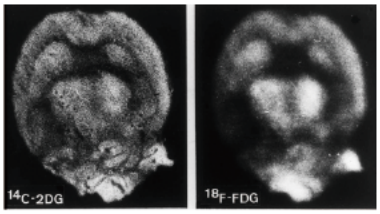
ここで PET によるガンの画像診断法がどのように開発されてきたかとについて、少し話してみたいと思います（図 8）。実は、この PET によるガン診断法の開発のきっかけは、先ほどお話がありました、ローレンスによるサイクロトロンの建設とほぼ同じころの 1930 年代にまでさかのぼることができます。1930 年に、ガン細胞がきわめて特異的な代謝をしていることが報告されました。これは O. Warburg という学者が報告したのですが、ガン細胞は普通の細胞よりもブドウ糖を非常にたくさん摂っていて、しかも酸素を使わないような代謝系が盛んであることを報告しました。

その直後の 1932 年に、先ほどお話にありましたアンダーソンが、陽電子を発見しました。この陽電子の発見が、その後、1975 年の PET スキャナーの開発につながり、PET の原理がここでようやく現実になったわけです。それとともに、PET によるブドウ糖代謝の測定の試みがなされていました。ちょうど 1976 年に、司会をしていただいている井戸先生が、ブルックヘブン国立研究所 BNL で、フルオロデオキシグルコース Fluoro-Deoxy Glucose（FDG）というブドウ糖の代謝を測定するためのフッ素 F-18 で標識した放射性薬剤の合成に初めて成功されました。もともとは、脳のブドウ糖代謝を測定するためにつくられた薬剤ですが、私が 1980 年からこの BNL に行ったときに、これで大腸ガ

# フルオロデオキシグルコース（FDG）

2-deoxy-D-[$^{14}$C]glusoe (DG)
2-deoxy-2-[$^{18}$F]fluoro-D-glusoe (FDG)

- ブドウ糖に類似した挙動
- 神経活動を評価できる



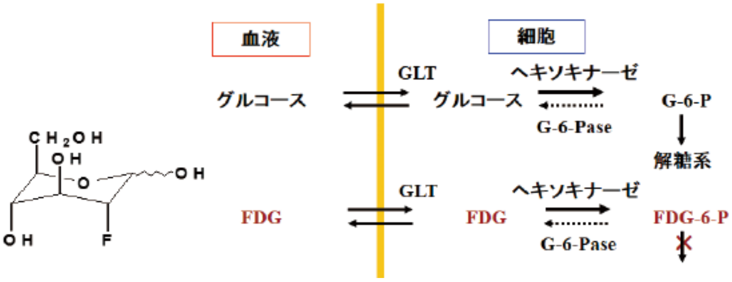




図 9

# 最初のFDG検査


図 10（井戸達雄先生の提供による）

ンが肝臓に転移した患者さんのPET画像を撮ったのが、おそらく、PETでガンを診断した最初の画像だと思います。

これからさらに20年経って、2002年にようやく、FDGによるPET検査が保険適用になりました。考えてみますと、サイクロトロンの発明とガン細胞の特異的な代謝の報告から、約70年の歳月を経て医療のなかで使われるようになったわけです。

図9は、井戸先生が合成されたF-18 FDGの説明です。この後に話す分子イメージングの先駆けとなる重要な放射性薬剤でした。ブドウ糖（グルコース）は血液から細胞のなかに入ると、ヘキソキナーゼという酵素によってリン酸化されてグルコース6リン酸（G-6-P）になり、その後、炭酸ガスと水に分解されていきます。それに対して、グルコースのOH基の1つがH基に置き換わったデオキシグルコース（DG）という化合物は、グルコースと同じように細胞の中に入ってヘキソキナーゼによってリン酸化はされるのですが、その後の分解を受けずに細胞内に止まってしまう性質があります。この水素H基をポジトロン放出核種のF-18に置き換えたF-18 FDGを使えば脳のブドウ糖代謝が測れるのではないかということでFDGが合成されたわけです。

最初は、この薬剤をラットに投与して一定時間を経過した後に、脳の薄い切片を取ってそれをフィルム上に感光させて、脳のブドウ糖代謝が測定されました。その後、F-18からの陽電子が崩壊して出てくるガンマ線を測れば画像ができるのではないかということで、1970年代の後半に脳のブドウ糖代謝が初めて測定されました。

図10は、井戸先生からそのときの写真をお借りしたもので、ご紹介させていただきます。1976年の8月16日とのことです。左上がサイクロトロンのターゲットですが、BNLにあった大型のサイクロトロンで実際にFDGが合成されました。とても若い井戸先生がいらっしゃいますが、それを梱包してフィラデルフィアまで小型機で運ばれました。BNLは、ニューヨークから車で1時間から1時間半ぐらい北東にあるロングアイランドという島の田舎にありますので、小型機でフィラデルフィアの空港まで運ばれ、そこから、カメラのあったペンシルバニア大学に送られて、ここで初めてヒトにおけるFDGの画像が撮影されました。

FDGで脳のブドウ糖代謝を測ることができるということと、ブドウ糖代謝はガン細胞でも非常に亢進しているということからヒントを得て、BNLではガンの患者さんのPET検査を行いました（図11）。大腸ガンが肝臓に転移した例のFDG投与後のPET画像です。投与初期にはFDGが抜けている部分が、50分後には、大きなガンに集中しているのがわ

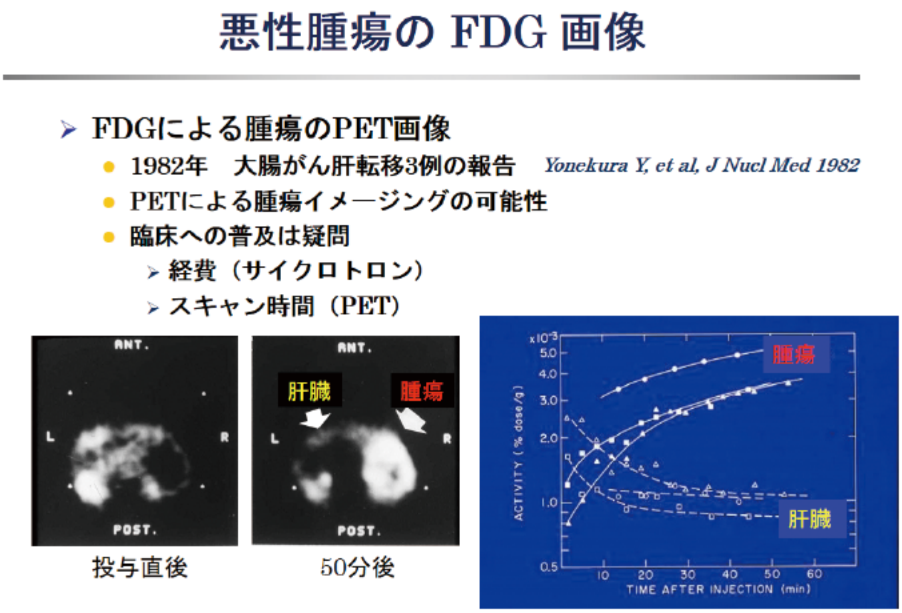



図 11

かります。当時の PET カメラは 1 スライスしか撮れませんでした。まさに予測したように、肝臓全体からは FDG がどんどん抜けていって、ガン細胞に集まるということが分かりました。これが報告されたのは、1982 年です。

当時から現在までの PET のスキャナーを比べてみました（図 12）。左上は、先ほどお話しした 1975 年にセントルイスで初めてつくられた PET スキャナーと同じものです。これが BNL に移されて、ここで実際の検査が行われていました。検出器がむき出しになっていますが、この PET スキャナーは、スキャンをしながらちょっと検出器の角度を変えて、また次のスキャンをするということを繰り返しています。ぐるりとひと回りの画像を撮るのに、10 分ぐらい掛かっていたのを記憶しています。1983 年頃になりますと、これがきれいなリング型のスキャナーになりました。わざわざ回さなくても、このような形で置いておくだけで、全方向のデータが取れるようになりました。しかも、この写真ではよく見えていませんが対軸方向、奥行き方向に 7 つの断層画像が、同時に撮れるような、現在の PET スキャナーのもとになるものが開発されたわけです。ただそれでも、先ほど話したガンの肝臓転移の報告をした 1982 年頃には、全身のガンをこういう PET 装置で見るのは無理だというのが当時の考え方でした。なぜ臨床検査ができないかと言うと、1 つ

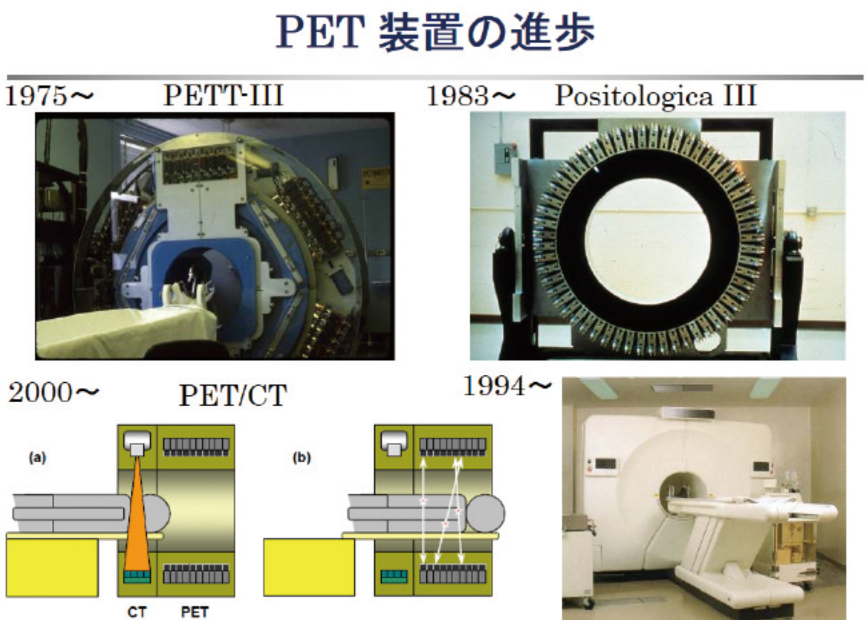



図 12

はサイクロトロンを持って検査をすることはコストがかかるので考えられなかったわけです。当時はまだ FDG が放射性医薬品として供給されるようなことは考えられていませんでした。もう 1 つは、ガンを見るためには全身を見なければならないが、とても全身をカバーできるような PET 装置は考えられませんでした。確かに、最初の PET スキャナーは、1 断面撮るのに 10 分掛かってしまいましたので、とても全身を見ることはできないということです。

これ以後、1990 年代に入ってまいりますと、全身が比較的短時間で撮れる装置が出てきました。そして、2000 年以降になると、さらに PET 装置に CT を同時に加えたような商品が出てきました。現在使われている PET カメラは、ほとんどが CT と一体型になったものです。これによって、ようやく診断法として確立されたことになります。

この FDG-PET 診断法が、なぜこれほど注目されたのか。そのきっかけとなったのは、もともとは 1982 年の肝臓転移のデータですが、実際には PET カメラの性能の向上によるところが非常に大きいわけです。そして、最も臨床医が注目したのは次の点です。

ガンがあるかないかということは、CT とか MRI で器官の形態を見ればある程度は分かります（図 13）。ただ、例えば肺ガンの患者さんで、肺ガンがあるからといって、ここ

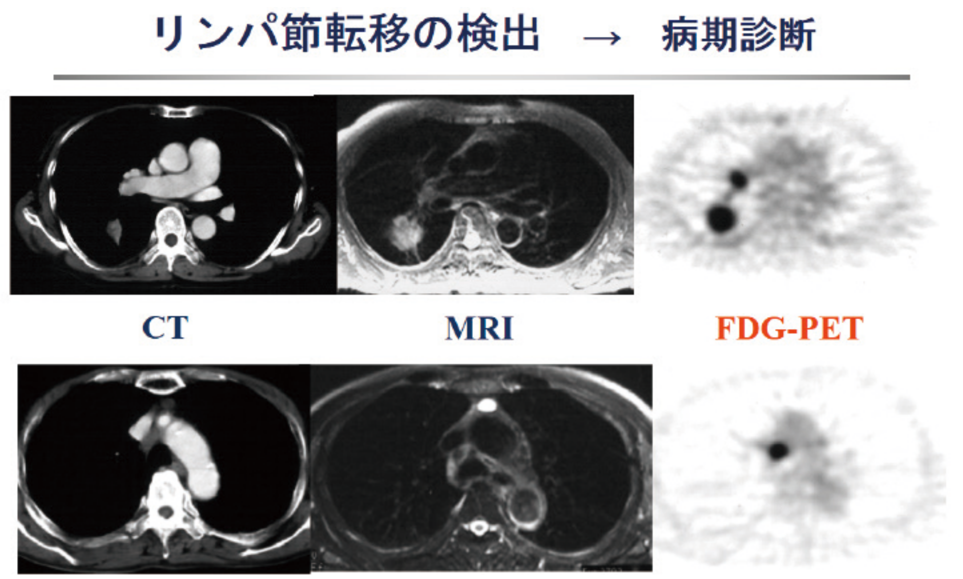



図 13

を手術できるのかと言うとできません。なぜできないかと言うと、もしガンのある肺の反対側のリンパ節にガンが転移をしていたら、手術をすること自体がまったく意味のないことになります。つまり、この患者さんの延命効果には決してつながらないからです。肺ガンが見つかったら、次にそのガンが近くのリンパ節にどこまで浸潤しているのかを見る必要があります。そのときに、PET の診断法が非常に役に立ちます。FDG-PET 画像で肺ガンと同じ側の肺だけにリンパ節転移が留まっているときには、そのガンのある側の全肺を取ってしまえば、反対側に転移がないということから、安心して手術ができるということで、最初はこのようなリンパ節転移の検出、病気のステージングに使われました。

その後、全身を比較的簡単に撮れるということから、より進んだ形でのステージング、すなわち全身を一度に見るスクリーング検査法になっていきました（図 14）。臨床診断には、いろんな診断法が医療現場で使われています。CT や MRI ももちろん使っているのですけども、全身を一挙に見るっていうのには不得手です。CT に関しては、全身を観察することは、当然被ばく線量も多くなってきます。そこで、FDG-PET の現在の使われ方は、もしガンが見つかったら、そのガンだけではなくて、それが全身にどこまで広がっているのかを発見するための検査法という形で使われるようになりました。そして、怪しいところが見つかったら、今度はそれを CT や MRI で確認するという方法に変わっています。

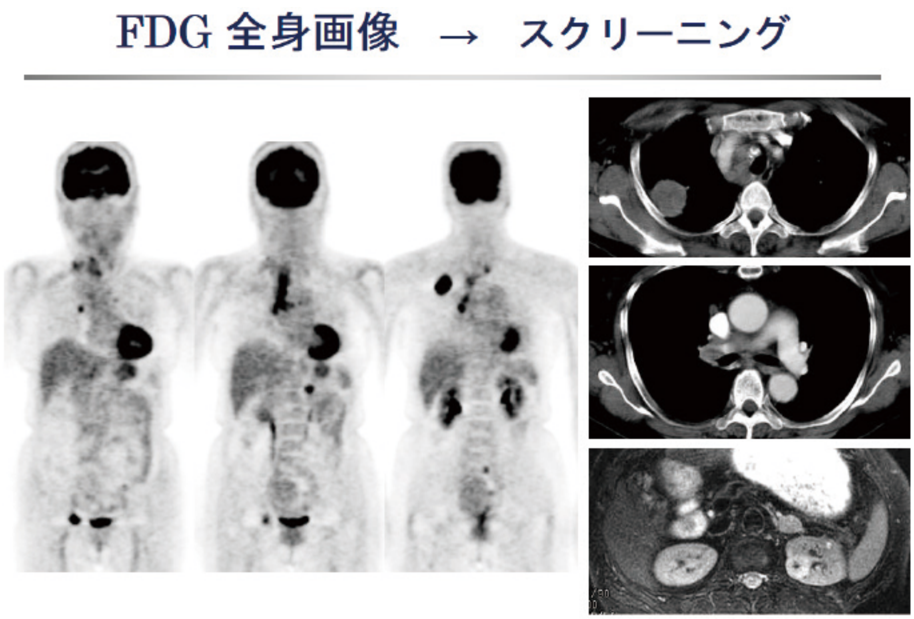



図 14

それからもう１つ重要な使われ方があります。一度治ったと思ったけれども、それが再発してくるのが怖いわけです。当然そのリスクは常にあるわなので、多くの場合に、少なくとも５年間、ガンの種類によっては 10 年程度のフォローアップが必要になってきます。そのときに、当然ですが、痛みなどの症状が出てきたり、あるいは、ガンの再発が外から触れて分かるほど大きくなってきたという時点では遅すぎるので、できるだけ早く再発を見つけたいというときに、この診断法がとても役に立っています。

ここに示した（図 15）のは、卵巣ガンの患者さんで、手術と化学療法、抗ガン剤による治療でいったん治癒したと判定されました。完治と思われたのですが、血液検査で血液の腫瘍マーカーを調べてみると正常範囲だけれども徐々に徐々に上昇してきました。何か怪しいということで PET 検査をしてみると肝臓の部分と骨盤の後ろのところに２個所怪しい病変があるこということになり、FDG-PET で実際に調べてみると、どちらにもガンが再発していることが分かりました。こういうモニタリングという使い方が役立つと考えられています。

一方、いろんな治療を行うにあたって、その治療効果がほんとにあるのかどうかをできるだけ早く見つけたいということがあります。現在の化学療法は数週間かかることが多い

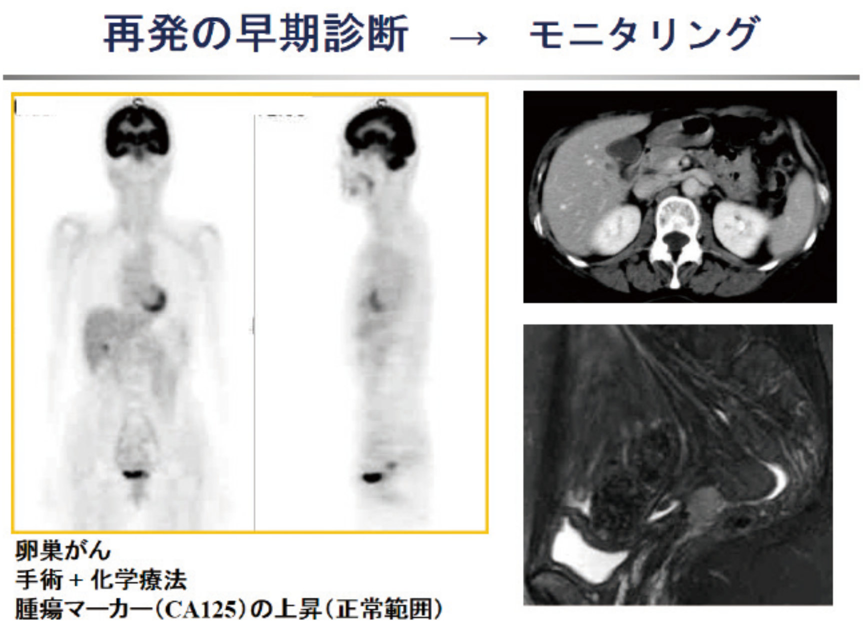



図 15

のですが、結果としてそれが効いたか効かなかったかを判断するのに、場合によってはさらに数ヵ月かかるという事態になり得るわけです。それに対してできるだけ早く分からないかということで、抗ガン剤の治療を始めて 1 週間程度で検査をして、ガン細胞が反応したかどうかで効果を推測するという使われ方も考えられています。

それからもう 1 つ。先ほどからお見せしているように、CT や MR の画像は体の形を表してくれるので分かりやすいのですけれども、実態としてどれがガンなのかということを見つけるのが難しいこともあります。一方、PET の画像は、何かあるということは分かるのですが、病変の正確な位置を知ることが難しいことがあります。そこで、この両方を重ねる融合画像が、頻繁に使われるようになってきています。

さらには、健康な方へのガンの検診法としてこの方法を使うことも行われるようになりました。

現段階で、FDG-PET をガンの集団検診として使うということに関してコンセンサスは確立されていません（図 16）。なぜかと言いますと、この検査は少ないとは言え当然放射線による被ばくを伴います。また、それなりのコストがかかります。集団健診として行うためには、それによるメリットがデメリットを上回るということが証明される必要があり

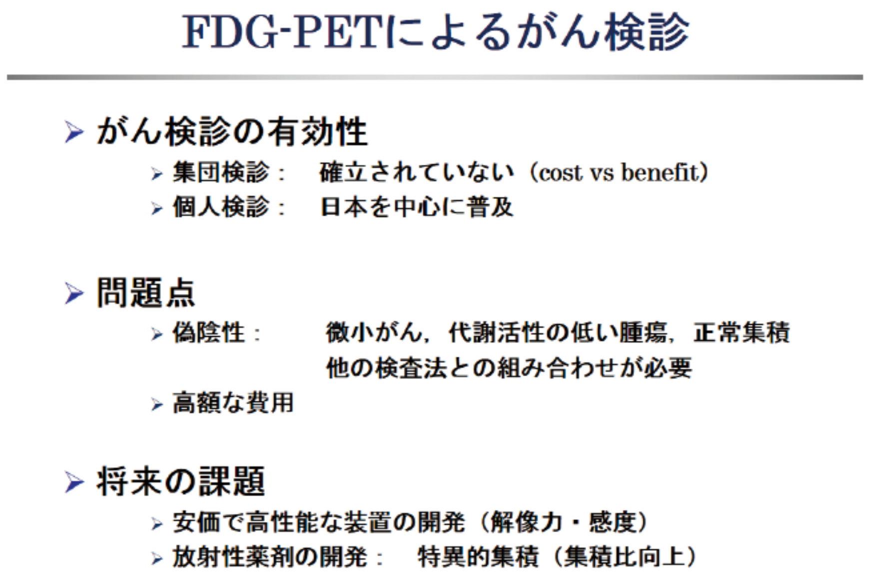



図 16

ます。日本を中心とした一部の地域では個人の健診によく使われています。個人としてこの検査法を受けることに対しては、特に規制するものではありませんので、普及したということがあります。

ここで、問題点も浮かび上がってきました。当然ですが、もともとこの検査法はそれほど感度の高いものではありませんので、数ミリ以下の小さなガンに対してはあまり役に立たないということが分かってきました。それから、もともとブドウ糖代謝を測っている検査法ですので、代謝活性の低いような腫瘍には問題がありますし、正常な部位に集積したときガンかどうかの判別が必要だという利用法の問題もあります。ということから現段階では、他の検査法との組み合わせが必要ということになっています。また、1 回あたり数万円から 10 万円という高額な検査費用がかかりますので、これを健診として普及させるのには課題も残されています。将来の課題としては、できるだけ安くて高性能な装置が開発される必要があります。それから、放射性薬剤の開発では、よりガンに特異的な薬剤が見つけられないかということで研究が進められている段階です。

ガン診断の高度化が重要になってきた最大の理由は、ガン治療法の高度化にあります（図 17）。今までのガン治療は、見つかれば切るというのが一般的でしたが、放射線治療や優れた抗がん剤も開発されてきました。その結果として、より正確な、精度の高い診断

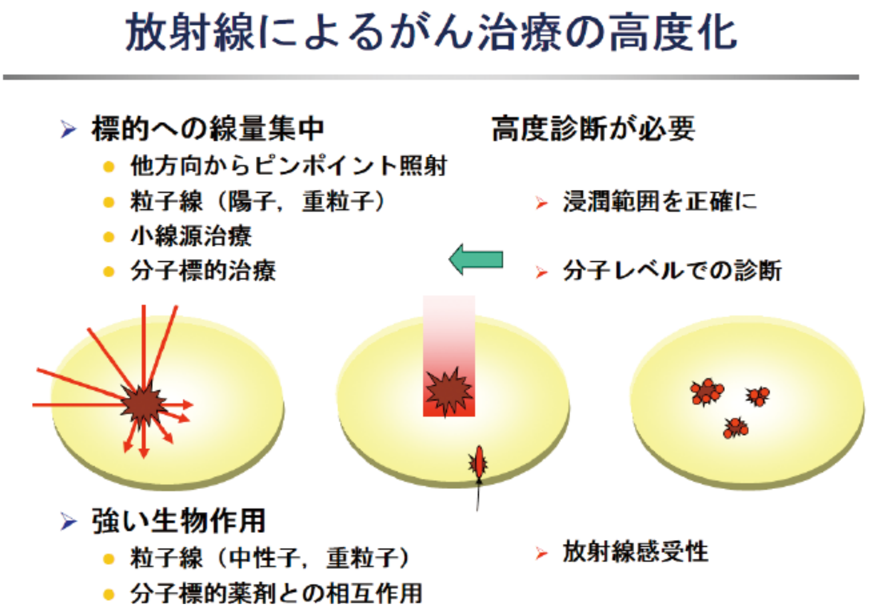



図 17

が求められるようになってきたという現状があります。

放射線治療については、ようやくわが国においてもその重要性が認識されるようになりました。しかし、欧米と比べると日本における放射線治療はまだまだ少ないというのが問題としてあります。正確な診断が求められる理由の 1 つには、放射線治療の高度化に伴って標的とするガンへの線量を集中することができるようになってきたことがあげられます。その方法としては、まずいろんな方向からガンに対してピンポイントで照射することが可能になってきました。この新しい治療法は、いろんな方向から照射することによって、選択的にガン細胞だけを叩くということができるようになりました。従来の放射線治療では、1 方向あるいは 2 方向からしか照射をしなかったために、大まかにガンの範囲がわかればよかったのですが、精度の高い治療法が使われるようになると、どこまでガン細胞があるのかをきちんと判断することが求められます。

さらには、陽子線や炭素イオン線などの粒子線を用いる新しい放射線治療が登場してきました。粒子線ガン治療では、1 方向からの照射でも、ちょうどガン細胞の辺りで非常に強力な作用を示して正常組織への被ばくが少なくてすむ、そういう新しい治療法が出てきました。この場合にも、ほんの少しの場所の違いで急激に被ばく線量が変わりますので、

正常組織との境界がどこにあるのかということをきちっと判断する必要があります。

さらに新しい診断法として、小線源治療と呼ばれる治療法があります。前立腺ガンなどの治療に使われていますが、直接ガンに線源を入れて、そこから出る放射線でガンを叩こうというものです。これはガンが局所にある場合には非常にいい治療法になっています。それから分子標的治療といわれる新しい治療法が、放射線にも応用されようとしています。もともとは化学療法の一つで、体のなかにあるあちこちに転移しているガンに対して、ガンだけに集まるような選択性のある薬剤をうまく利用すると、ガン細胞だけを叩くことができます。

こういう治療法が出てくると、それに対して非常にレベルの高い診断が要求されるようになってきました。どこまでガンが浸潤しているのかという範囲を正確に求める必要があること、分子標的治療などへの応用に関しては、分子レベルでの異常を診断することも必要になってきました。これが、分子イメージングに期待されている大きな課題です。それともう１つは、中性子や重粒子などの粒子線の持つ非常に強い生物作用の利用があります。分子標的薬剤と放射線を併用するという考え方では、放射線の感受性を調べる必要もあります。

次世代のガン診療に求められる重要な課題（図 18）として、治療法の最適化があります。手術だけではなくて、放射線、化学療法、免疫療法等、さまざまな治療法が出てまいりました。場合によっては、これらを複数使うような治療法の組み合わせが、今後の新しいガンの治療法になっていくものと思われます。ここで重要なことは、同じ肺ガンになっても、同じ大腸ガンになっても、その持っている腫瘍の性質によって、治療法が変わる可能性がある点です。当然、患者さん個人によっても、治療法が変わりますし、同じ個人が、同じガンであっても再発した場合には、その性質が変わっているかもしれないので、その状態に対応した治療が必要になってきました。こういったことから、治療法を最適化するために情報が必要で、ここに分子イメージングが求められる理由があります。やはり早期診断法の開発と確立が急務の課題ですが、それとともに、治療効果と副作用が予測できるような、例えば放射線や化学療法に対する感受性、あるいは相互作用といったものを、一緒に診断する分子イメージングというのが、求められているのだと思います。残念ながら、我々が持っているデータは、まだまだここまで至っていません。

ここからは、こんなことができるのではないかというアイデアを話してみます。ガンの分子イメージングの例（図 19）としては、現在は先ほどからずっと話をしてきたブドウ

## 次世代のがん診療に求められるもの

- 治療法の最適化
  - 多様な治療法（手術，放射線，化学療法，免疫・・・）
  - 複数の治療法の組み合わせ
  - 腫瘍／個人／状態に対応した治療
  - コスト（医療費，時間，社会資源・・・）
- 早期診断法の確立
  - ハイリスクグループにおける早期診断
- 治療効果と副作用の予測
  - 感受性（放射線，化学療法）
  - 相互作用

診断が重要！

図 18

## 腫瘍分子イメージングの例

| | |
|---|---|
| エネルギー代謝の亢進 | FDG |
| 活発な細胞増殖 | FLT |
| 低酸素 | Cu-ATSM |
| 血管新生 | RGDペプチド |
| 特異的遺伝子発現 | アンチセンスDNA<br>レポーター遺伝子 |

図 19

糖代謝の亢進を見る方法しか使われていないのですが、ガン細胞は非常に活発な細胞増殖をしているので、そのような細胞増殖能を見るような新たな診断法が考えられます（Fluoro-thymidine：FLT）。また、ガン細胞の一部は低酸素状態でも非常にしぶとく生き延びるという性質を持っています。またこの低酸素にあるガン細胞は、やっかいなことに治療に対して極めて抵抗性が高いということが分かっています。このような低酸素部位に集積する化合物を見つければ（Cu-ATSM）、診断法の選択が変わるのではないかということが分かります。それから、ガンは常に血管新生を伴う―すなわち常に血管を誘導しながら成長するという性質を持っているので、血管新生イメージング剤による診断も模索されています（RGD ペプチド）。遺伝子治療等については、遺伝子そのものをターゲットとするガンの診断法の開発も、進められています（アンチセンスDNA、レポーター遺伝子）。

ガン診断のトピックスとして、ガンの低酸素状態を画像化する試みを紹介します。半減期 10 分のポジトロン核種 Cu-62 を標識した Cu-ATSM という放射性薬剤が開発されています（図 20）。

これは、現在の福井大学の藤林教授らによって開発された低酸素細胞のための画像診断術です（図 21）。この PET 画像から Cu-ATSM がガンにしっかり集まってくるということが分かりました。その集積はガン全体に均一ではなくて、極めて不均一な分布でガンに分布しています。これによってガンのなかでも放射線治療に対する抵抗性が高い、あるい

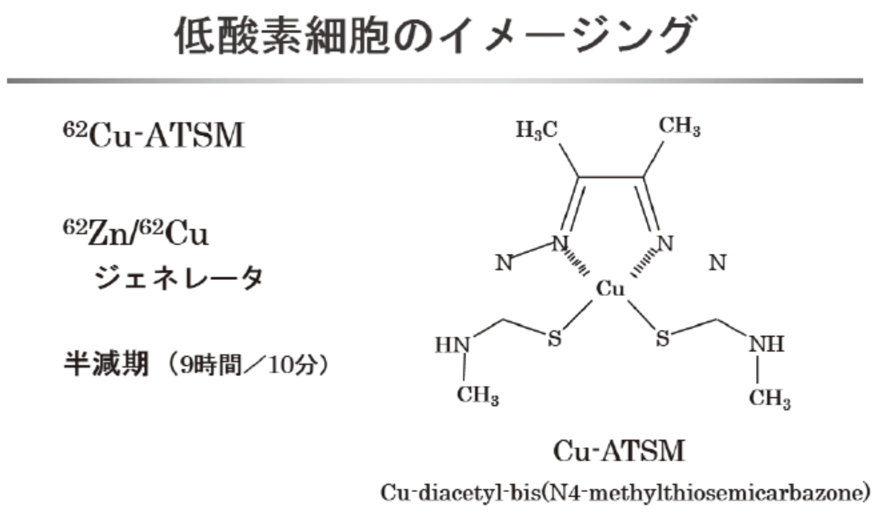



図 20

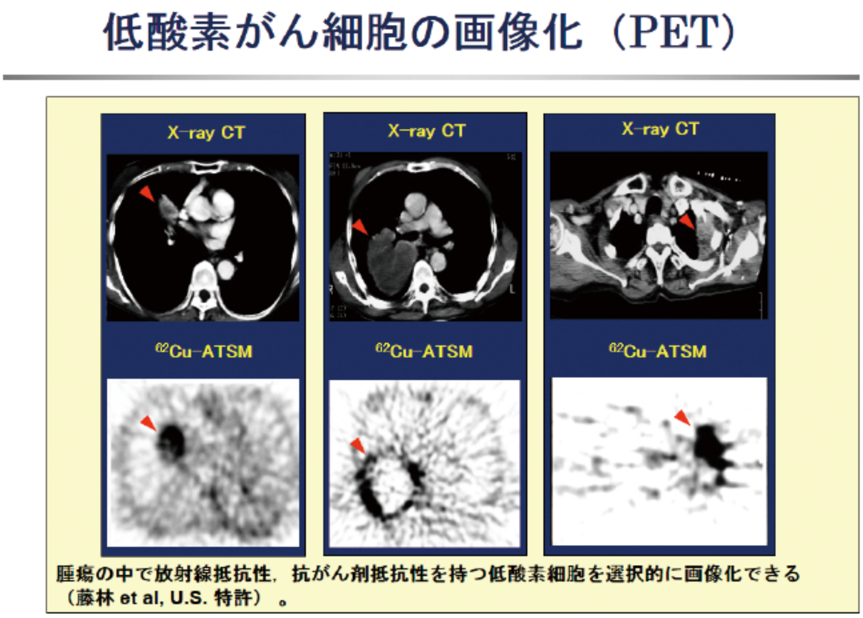



図 21（福井大学藤林教授の提供による）

は抗がん剤に対する抵抗性を持つと考えられている低酸素細胞を選択的に画像化できるという可能性が示され、これに注目したわけですが、その後、この低酸素環境にあるガン細胞が、極めて特異的な性質を持っていることが分かってまいりました。

組織（図 22）を見ますと、専門外の方には分かりにくいかもしれませんが、Cu-ATSM が集積している部位の特徴が明らかになっています（下段）。そこでは、細胞増殖はほとんど止まってしまっています。アポトーシスと呼ばれる細胞死が散在して見られますが、そこには血管は誘導されていなくて、じっと眠っているガン細胞であることが分かってきました。これは、最近注目されているガンの幹細胞と呼ばれる性質と同じです。この部分は、放射線に対して抵抗性が高いし、抗ガン剤に対しても極めて抵抗性が高いわけです。ところが、ここに何らかの刺激が加わると、下段から上段の FDG が高い集積を示す組織のように、どんどん分裂をするような細胞も出てくるということが、最近分かってきました。

実際にそれを示すような臨床研究のデータも米国から出ています。Cu-ATSM がガンにしっかり集まっていた群というのは、放射線治療や化学療法に対してその後の再発率が高いということが分かってきました。このような情報が治療を受ける前に分かれば、無駄な

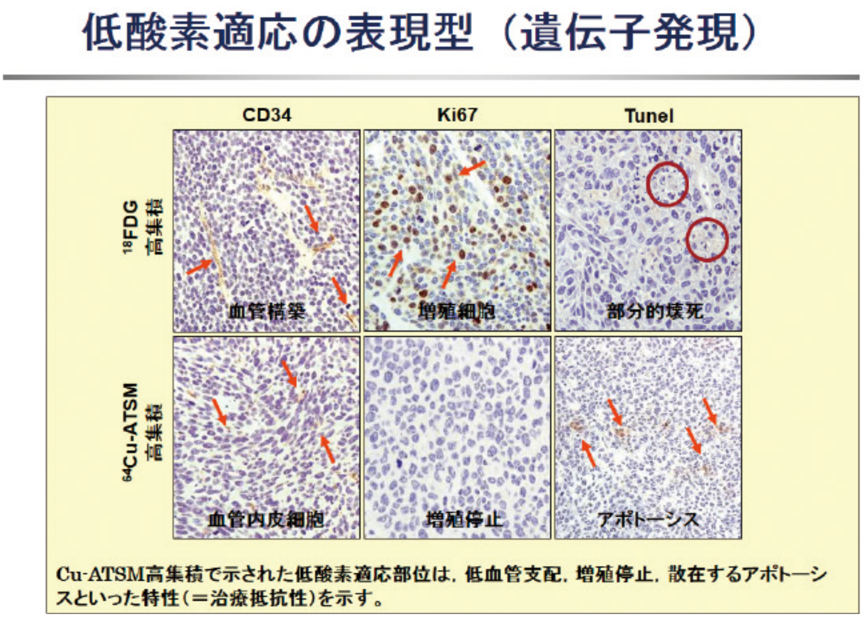



図 22（福井大学藤林教授の提供による）

治療を避けて、重粒子線治療のような生物効果の高い方法を使う必要が判断できるわけです。

そこで低酸素のガンに対しては、何らかの別の治療法が必要になってきます（図 23）。外科的に切除できればそれがよいのですが、普通の化学療法や放射線治療では駄目ですから、それに代わるものとしては、例えば重粒子線治療は、こういった低酸素細胞に対しても同様に治療効果が高いという生物学的データがありますので、これに頼ることが考えられます。あるいは、直接このガン細胞を叩くような別の方法を考える。あるいは抗ガン剤のなかでも、こういうものにも効いてくれるような新しい抗ガン剤を開発する。そういった戦略が必要になってくると考えます。

その１つとして、このアイデアを直接治療に応用する研究があります。これだけきれいにガンだけに集まってくれるのであれば、ここにガン細胞を叩くようなアルファ線、あるいはベータ線を出すような核種を付けてやれば、それを使って治療できるのではないかという考え方です。正常組織には、ほとんど集まっていません。そう考えると次のような方法が考えられないかということです。

銅のアイソトープのなかで、ベータ線とそれからポジトロンの両方を出す核種として銅

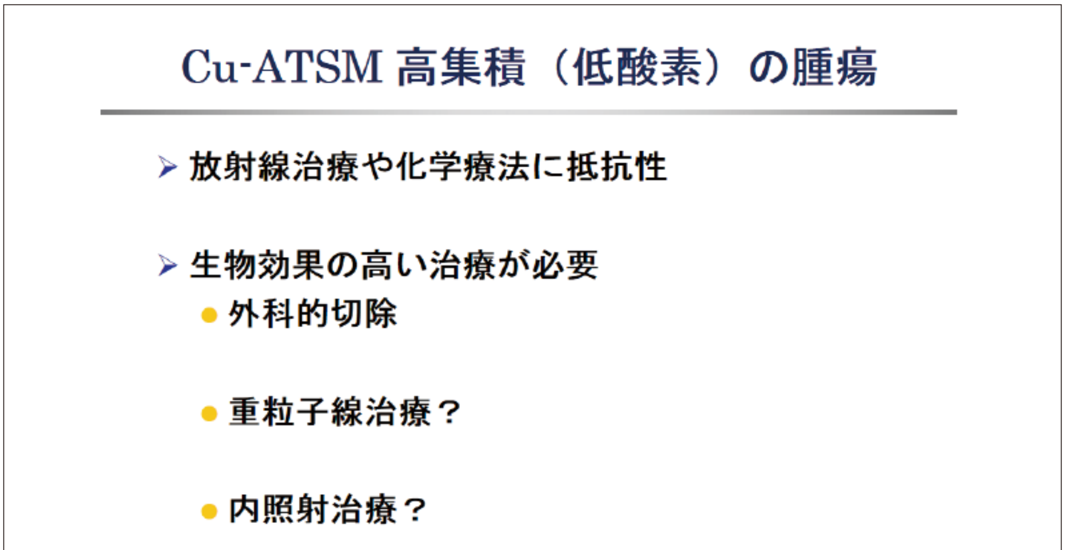


図 23

の Cu-64 があります。これは半減期 12 時間という比較的手ごろな半減期の核種で、これを使うと、ベータ線とポジトロンの両方を出してきますので、ポジトロンでもってその集積具合を見ながら、ベータ線の方で治療を行うということが可能になります。実際にこれを使ったハムスターに移植したガン細胞に対して 1 回治療を行ったデータが少し古いのですが、2001 年に出ていて、動物実験の段階ではよく効いているようです。

分子イメージングによるガンの診断をまとめてみました（図 24）。分子イメージングによるガン診断は、基本的には治療法の選択に結びつく診断です。それから、治療効果の判定、再発の診断に、極めて重要でもあります。そしてこれが非常に大事なキーワードですが、治療効果の予測につながるのではないか、そして将来的には、これをうまく利用すれば、放射線治療による微小ガン治療の可能性に繋がらないものか。つまり、全身に転移したガンに対しても、先ほどのお話ししたような治療を目的としたアイソトープを使って、ガンを治療できる可能性があります。

最後に少し時間をいただいて、アルツハイマー病の早期診断についてお話をしたいと思います（図 25）。アルツハイマー病は、現段階では、アミロイドが沈着することによって、神経細胞死を招いて、記憶障害から認知症に至ると考えられています。問題は、認知症として診断されるときには、もうこれらの一連のプロセスがすべて終わったあとなので、あまりにも遅すぎるわけです。これに対して、何らかの特徴的な機能画像を使えば、早期診

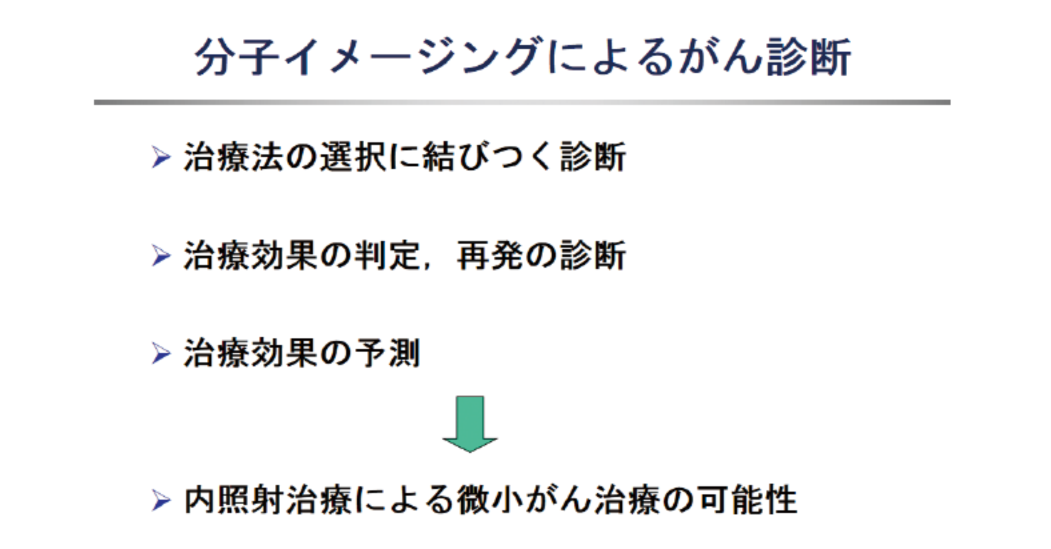



図 24

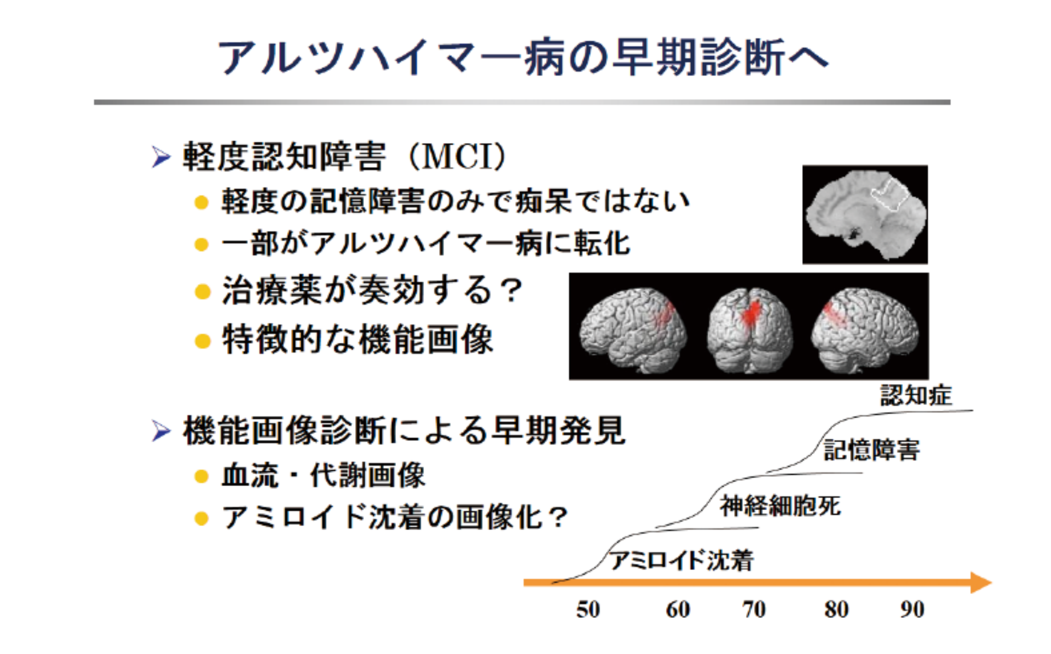



図 25

断できるのではないかとの期待があります。現段階では、血流や代謝画像を使って、脳のなかのごく一部、特に後部帯状回と呼ばれる脳の後ろ側のしかも内側の部分から病気が始まるらしいということが分かってきて、認知症になる少し手前の軽度認知障害と呼ばれる

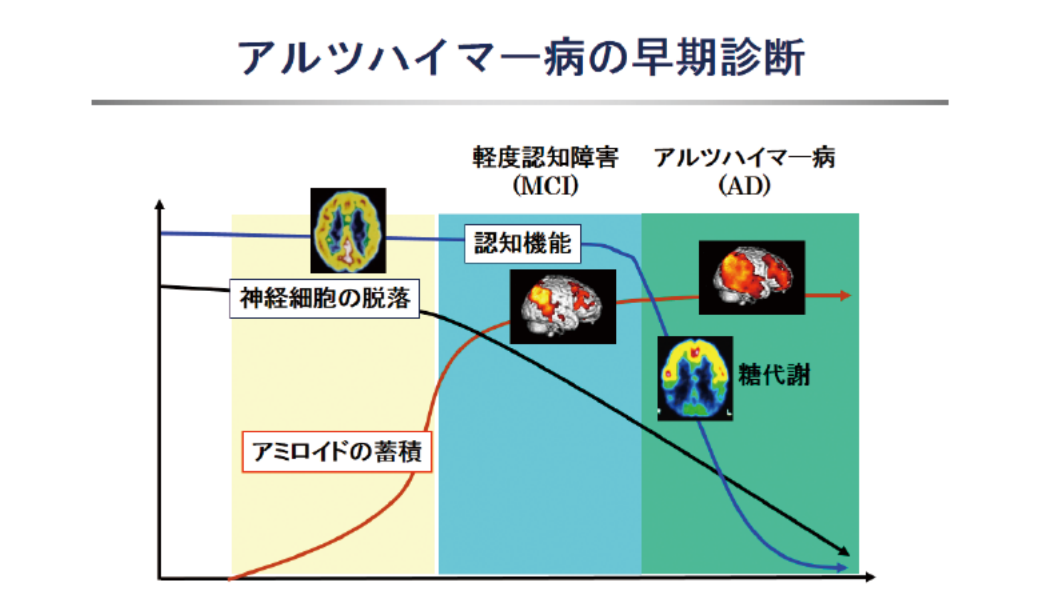



図 26

患者さんに対して、その検査を行って、最終的に認知症になるかならないかの予測ができるのではないかという多施設共同研究が進んでいます。

この沈着したアミロイドを PET で画像化ができるではないかということで研究が進められております。

このアルツハイマー病の早期診断に関しましては、ガンの早期診断とは違って、少しやっかいな問題があります（図 26）。もちろん、診断は早ければ早いほどよいのですが、現段階ではまだ治療法が確立されていないという問題があります。そうすると、この検査をまったく健康な方のスクリーニング検査に利用できるのかというのが大きな問題です。ただ、治療薬等の進歩には非常に早いものがありますので、こういう診断法が確立されて、神経細胞が実際に脱落する前にアミロイドがたまっていることを診断できれば、そしてそれを防止できるよい治療法が出てくれば、この診断法は社会的に非常に大きな意味を持っています。

ただここでも、集団検診として使うためには、メリットとリスクの両方を比べてみて、ほんとにこれが集団検診に役立つかどうかということを判定する必要があります。例えば遺伝的にあるいは家族性のリスクの高い方だけにしぼって検査をするという方向にいくのかもしれません。

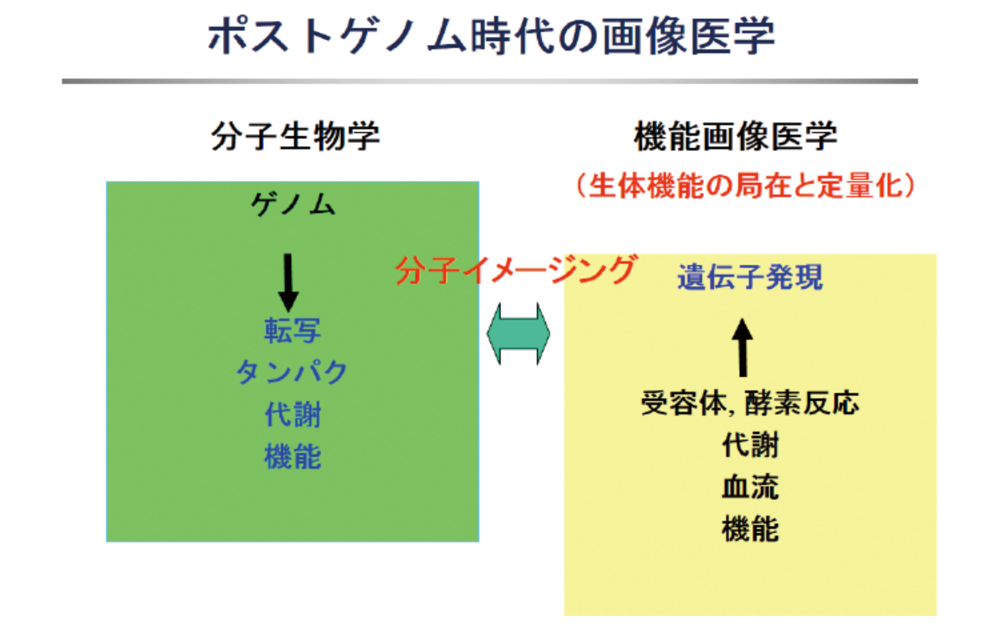



図 27

今日のまとめ（図 27）です。いわゆるポストゲノムの時代に入ってきました。分子生物学の研究者たちが、ゲノムからどのようにタンパクがつくられ、代謝や機能が発現するかいうことを調べています。私たち、核医学をはじめとする機能医学の分野では、いろんな機能、血流や代謝から、受容体、酵素反応などを調べてきたのですが、ようやく遺伝子発現にたどり着きました。遺伝子発現を画像化できるような段階に来て、両者を結ぶのが分子イメージングであると結論したいと思います。そのときのキーワードになるのは、体の機能を生きたまま定量的に見るということで、これが今日の分子イメージングの基本となり、今後の新しい医療に重要な役割を果たすと考えています。

司会　米倉先生、どうも有難うございました。アイソトープを利用した分子イメージングが診断だけでなく治療と直結した分野でも役に立っていること、また、ガンの診断だけでなく脳の治療にも応用範囲が広まっているというお話をしていただきました。今回の仁科記念シンポジウムには、核物理から核医学まで非常に広範囲なところをテーマにさせていただきました。出席された皆様方の満足度は、どのぐらいであったか、80%を超えていればいいなというふうに思う次第でございます。

最後に、ご挨拶を日本アイソトープ協会副会長の田畑先生にお願いいたします。

## 「閉会の挨拶」

### 田畑 米穂（日本アイソトープ協会副会長*）

ご紹介いただきました、日本アイソトープ協会の副会長の田畑でございます。今日の仁科記念シンポジウムでは、アイソトープ科学の最前線のテーマを中心にして、最初に山崎先生から仁科先生のご業績の概略について、いろいろとご紹介がございました。私はアイソトープに関したケミストリーが専門でございまして、核物理の方は素人です。わが国におけるアイソトープ科学の普及の出発点ということでは、理化学研究所、それから日本アイソトープ協会、仁科記念財団が関与しておりまして、そのルーツにおいて、仁科先生を通して結ばれていると思います。今回の共同主催は初めての試みでございますが、三者のつながりを再確認できたということで意義があったかと思います。

ただ、先ほどご紹介ありましたように、仁科先生のカバーされている分野は、核物理、加速器、それから RI 製造、応用の開拓と、大変広い分野でございますので、アイソトープの利用はその一部になろうかと思うわけであります。

RI の研究と利用のスタートの時期について、少し振り返ってみますと、1949 年ごろだったと思いますが、総理府のなかにアイソトープ利用の委員会が発足しまして、仁科先生が委員長でいらっしゃったわけです。1950 年に初めてアメリカから日本に、仁科先生への寄贈というふうな形で、アイソトープが送られてまいりました。これがわが国におけるアイソトープの利用の出発点になりました。

仁科先生は、翌年の 1951 年の 1 月に、大変残念なことに病気でお亡くなりになられま

*2014 年 6 月に日本アイソトープ協会副会長を退任された。

した。それで51年の5月にアイソトープ協会が設立されて、茅誠司先生が会長になられました。これが、わが国におけるRI利用、RI科学の組織的な始まりでございまして、仁科先生が核になってスタートした、と言えます。

仁科先生に直接お目にかかった方は、もうここのなかでも非常に限られていると思います。先ほどの矢野先生のお話でも、仁科先生が亡くなられたときは3歳でいらっしゃったそうです。実は、私は当時東大工学部の応用化学の1年生でした。仁科先生が1949年にコペンハーゲンの国際会議に出席されインド経由で帰られた時に、小さな報告会と言うかセミナーがございました。セミナーは工学部電気工学科の建物の正面から入って左の方の少し小さい部屋で行われ、大山松次郎工学部長が司会をされました。仁科先生に直接お目にかかれたのは、それが最初で最後でございました。大変、感慨深いものがございます。先ほどの中根先生は、仁科先生の研究室にいらっしゃったわけですから、直弟子ということで貴重な存在だと思います。私にとって仁科先生についてはそのような昔の思い出がございます。

RI利用、RI科学は、約60年近い歴史を持っておりまして、本日3人の先生のお話にもありましたように、大変大きな広がりと、今までに大きな進歩と発展があったわけでございまして、人類の福祉に大変貢献をしています。繰り返しですが、本日はRI利用の発展の歴史と最先端の科学技術の進展につきまして概観することができ、大変有意義なものであったと思います。今後は適当な時期に、また、これより進んだ形の催しを企画したいと考えております。最後に、素晴らしい講演をしていただいた3先生、それからこのシンポジウムの企画、準備していただきました関係者の方々、それから熱心に講演をお聞きいただいた皆々様にお礼を申し上げまして、結びの言葉とさせていただきます。有難うございました。

東京都文京区本駒込二丁目28番45号（〒113-8941）
公益財団法人　仁科記念財団
電話　03（3942）1718
（2015年1月）1,000