第２回　仁科記念シンポジウム「アイソトープ科学の最前線」

原子力と仁科博士

仁科記念財団に今もある
仁科芳雄の部屋にて

プログラム

司会：矢野 安重（仁科記念財団常務理事）

「開会の挨拶」
小林 誠（仁科記念財団理事長）

「仁科芳雄博士と日本の核開発の端緒」
江沢 洋（学習院大学名誉教授）

「アイソトープの医学利用：Mo-99 問題など」
井戸 達雄（日本アイソトープ協会常務理事）

「素粒子・原子核から宇宙へ：スーパーコンピュータと現代物理学」
初田 哲男（理化学研究所仁科加速器研究センター主任研究員）

「閉会の挨拶」
田畑 米穂（日本アイソトープ協会副会長）

主　催
仁科記念財団、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

3月23日（金）14時～17時
科学技術館 サイエンスホール
（北の丸公園）

第2回 仁科記念シンポジウム

「アイソトープの最前線」

原子力と仁科博士

原子核に潜在する莫大なエネルギーを開放して人類の未来に平和をと願った最初の日本人は仁科芳雄博士である。

時は、第二次世界大戦。核物理学者の夢は原子爆弾の開発という歴史の怒涛に翻弄される。

今回の仁科記念シンポジウムでは、わが国の原子力開発の始まりから、現在の放射能の医学利用、そしてわが国のスーパーコンピュータ技術の粋を尽くした「京」による物質界の摂理の探求を、科学史、核医学、理論物理の3講師が語る。

講演1

「仁科芳雄博士と日本の核開発の端緒」

江沢　洋（学習院大学名誉教授）

ウランの原子核に中性子を当てるとふたつに分裂し莫大なエネルギーを発生する。この現象が発見されたのは1938年も末であったが、その2年後、日本陸軍の航空技術研究所から原子爆弾の研究を委託された仁科博士は、まず核エネルギーの工業的利用を考えた。実は核分裂をおこすのは天然ウランに0・7%だけ含まれる同位体、ウラン235であって、まずこれを濃縮しなければならない。それがすでに難事業で、成功する前に終戦を迎えた。

江沢　洋

一九六〇　東京大学理学部助手
一九六三　アメリカ・ドイツ出張
一九六七　帰国、学習院大学助教授
一九七〇　学習院大学教授
（一九七二―七四　アメリカ、ベル研究所・研究員）
二〇〇三　学習院大学定年退職

講演2

「アイソトープの医学利用：Mo-99 問題など」

井戸　達雄（日本アイソトープ協会常務理事／東北大学名誉教授）

生体内での元素の挙動を、サイクロトロンで製造したラジオアイソトープを用いて観察する試みが仁科博士等によって比較的早い時期に行われた。現在核医学診断として確立されている手法の草分けである。アイソトープの医学利用は疾患の診断のための核医学検査と主に悪性腫瘍に対する核医学治療である。核医学画像撮像装置の発達に伴ないポジトロン放出核種を利用できるようになりF-18FDGが開発され腫瘍診断に汎用されている。一方、原子炉で製造されるシングルフォトン放出核種のMo-99/Tc-99m は放射性医薬品として核医学診療に重要な役割を演じている。

井戸　達雄

一九七〇　放射線医学総合研究所研究員
一九七五　米国ブルックヘブン国立研究所客員研究員
一九七七　放射線医学総合研究所研究室長
一九八〇　東北大学サイクロトロンラジオアイソトープセンター教授
一九九六　日本アイソトープ協会理事
二〇〇六　日本アイソトープ協会常務理事

講演3

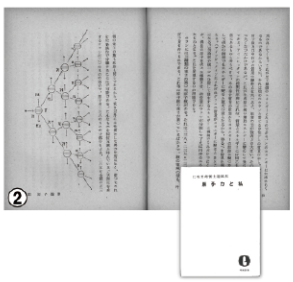
「素粒子・原子核から宇宙へ：スーパーコンピュータと現代物理学」

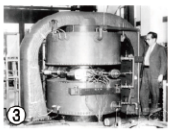
初田　哲男（理化学研究所仁科加速器研究センター主任研究員／東京大学大学院理学系研究科教授）

20世紀前半に、仁科芳雄、湯川秀樹、朝永振一郎らによって端緒が拓かれた原子核や素粒子の研究は、20世紀後半における理論と実験の進展により大きな進歩をとげ、物質の根源や宇宙の始まりについての知識が大きく拡大している。また、2012年中に本格稼働するスパコン「京」を用いた大規模数値シミュレーションは、現代物理学にさらなる飛躍を与えると予想されている。これらの進展について歴史を振り返りながら概観する。

初田　哲男

一九九二　ワシントン州立大学物理学科助教授
一九九三　筑波大学物理学系　助教授
一九九八　京都大学大学院理学研究科助教授
二〇〇〇　東京大学大学院理学系研究科　教授
二〇一一　理化学研究所仁科加速器研究センター　主任研究員





①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。

②『原子力と私』1951 年発行の仁科博士の遺稿集。

③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。

④1954 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。

司会　時間がまいりましたので、第２回仁科記念シンポジウムを始めさせていただきます。本日は皆様、このシンポジウムにお運びいただきまして、まことに有難うございます。私は、本日の司会を務めます、仁科記念財団の矢野でございます。どうぞよろしくお願いいたします。

本日のシンポジウムのタイトルは「原子力と仁科博士」であります。仁科芳雄博士は、ご存知の通り「日本現代物理学の父」と呼ばれる私達の大先輩でございますが、1951 年の１月に 60 歳という若さで国内外の多くの科学者に惜しまれながらお亡くなりになりました。その年の暮れに、このチラシの右下隅に小さく載せてあります仁科芳雄博士遺稿集「原子力と私」が出版されておりまして、このご本の表題に因みまして、本日のシンポジウムのタイトルを「原子力と仁科博士」といたしました。本の表題に「原子力」という言葉が使われたのはこの遺稿集が最初ではないかと思います。

本日は、３人の先生方に、放射線と放射能の、過去、現在、未来を語っていただきます。最初に江沢洋先生から「仁科芳雄博士と日本の核開発の端緒」という過去のお話をいただきまして、続いて、井戸達雄先生から「アイソトープの医学利用 :Mo-99 問題など」という現在のお話をいただきます。最後に、未来のお話として、初田哲男先生から「素粒子・原子核から宇宙へ：スーパーコンピュータと現代物理学」をお話していただきます。

それでははじめにご挨拶を、仁科記念財団の小林誠理事長にお願いいたします。小林先生、お願いいたします。

「開会の挨拶」

小林 誠（仁科記念財団理事長）

小林でございます。

本日は第２回仁科記念シンポジウム「アイソトープ科学の最前線」にご参加いただきまして、大変ありがとうございます。

主催者ということで、一言、ご挨拶を申し上げます。

このシンポジウムは、先ほどのお話にありますように、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、仁科記念財団の三者が主催するものでありますが、この三者の取り合わせを多少意外と思われる方がいらっしゃるかと思います。一言で言えば、

仁科先生にゆかりのある団体ということでありますが、少しだけ説明をさせていただきます。

言うまでもなく理化学研究所は、仁科先生が研究室を置かれて、我が国の原子物理学研究の礎を築かれたところであります。仁科先生は1920年代に理研から派遣されてヨーロッパに長く滞在され、有名なクライン＝仁科の公式などの成果を上げられて帰国され、その後、理研で仁科研究室を主宰されました。そこには朝永先生を初め多くの研究者が集まったということはよく知られているところでございます。

仁科先生は我が国のアイソトープ研究の草分けでもありまして、1937年に26インチ、1943年に60インチのサイクロトロンを建設され、アイソトープの研究・利用を進められたわけでありますが、このサイクロトロンが終戦後、GHQによって破壊され、東京湾に沈められたというのは、よく知られた話であります。

戦後のアイソトープ利用につきましては、1950年にアメリカから輸入が始まったと聞いておりますけれども、これにも仁科先生が大変御尽力されたということであります。その後のアイソトープ利用の拡大に伴いまして、一括輸入や配分その他をいろいろ行うために設立されたのがアイソトープ協会ということであります。アイソトープ協会ができたのは1951年のことでありますが、この年に仁科先生はお亡くなりになっておられます。仁科記念財団は仁科先生の業績をたたえ、原子物理学の分野ですぐれた研究者を育成しようという先生の御遺志を継ぐために設立されたものでありまして、1955年に設立されております。

理研は現在、和光市にございますが、仁科先生のころは駒込にありました。当時の理研の建物はほとんどなくなっているわけでありますが、アイソトープ協会の本部が置かれておりますのは、その数少ない残された旧理研の建物であります。また、仁科記念財団の事務所もそのアイソトープ協会の一角にございまして、やはり旧理研の建物でございます。特に財団事務室の隣の部屋が、仁科先生がまさに使っておられた研究室であります。ほぼ当時のままの形で残されているわけであります。お気づきかと思いますけれども、今回のポスターのバックの写真がその研究室の写真であります。真ん中に写っておりますデスクは仁科先生が使っておられたものであります。

さて、この三組織によりますシンポジウムは2008年に第1回が開催されておりまして、大変好評でございまして、今回が第2回ということになります。今回は、先ほど御紹介がありましたように、江沢先生、井戸先生、初田先生から御講演をいただきます。昨年の震

災以来、原子力や放射線に対する関心が高まっておりますが、今回の講演会が問題を少し広い視点からお考えいただく機会になれば大変幸いでございます。

　それでは、ごゆっくり御講演をお聞きいただきたいと思います。どうもありがとうございました。

司会　それでは、最初のご講演でございますけれども、理論物理学者であり、科学史家でもいらっしゃいます江沢先生から、「仁科芳雄博士と日本の核開発の端緒」という題でお話を伺いたいと思います。

どうぞよろしくお願いいたします。

「仁科芳雄博士と日本の核開発の端緒」

江沢 洋（学習院大学名誉教授）

「仁科芳雄博士と日本の核開発の端緒」という題をつけましたけれども、核開発というのはもちろん原子力の開発という意味です。ただ、今お話にありましたアイソトープの問題は、今日触れないことにしようと思います。狭い意味の原子力ということです。

こういう端緒というお話をしますと、私が原子力推進派であるかのように思われるかもしれない。そう思われてはちょっと困る。私は、まだ原子力というのは基礎研究が足りない、基礎研究をしなければいけない段階だと思っております。仁科先生も恐らくそう思って研究しておられたのではないでしょうか。日本の戦後の原子力開発は、物理学というよりは、あるいは工学というよりは、政治家とお金の勘定で急いで始まったというところがあると思います。そういうものの端緒を話すとは思わないでいただきたい。

1.　歴史的概観

最初に手短に歴史のお話をしたいと思います。

1.1　核分裂の発見　いわゆる原子力というのは、核分裂、重い原子核が中性子を当てると 2 つに割れるという現象の発見から始まったのです。 O. Hahn と F. Strassmann という人たちが、ウラニウムの原子核に中性子を当てるとバリウムができる、たいへん不思議な現象だと言ったのを、L. Meitner と E. Frisch という人が、それはウラニウムの原子核が 2 つに割れたのだと言った。この 1938 年、1939 年のあたりの発見がもとになっているのです。核分裂のときには非常に大きなエネルギーが放出されることも分かりました。原子核は陽電気をもつ球ですから、それが 2 つに割れると陽電気を持った球が 2 つできまして、陽電気と陽電気が反発して大きなエネルギーをもって飛び離れるのです。

1939 年の 1 月に N. Bohr がアメリカに渡りまして、核分裂発見のニュースを齎し大騒ぎになります。訪ねてきた G. Placzek に Bohr が「核分裂のことはだいたい分かった」と

いったところ、Placzek は「そんなことはない」と応じた。「ウランの中性子捕獲には 25 eV に共鳴のピークがあるが、核分裂にはない。不思議だ」Bohr は、しばらく考え込んで「それは核分裂するのがウランの希少な同位元素 ^{235}U に限られているからだ」と答えました。Bohr は、その後、J. Wheeler と協力して核分裂の理論をつくります。

原子核は、陽子と中性子という 2 種の粒子が集まってできています。それら粒子の総数をその原子核の質量数 A といいます。^{235}U というのは質量数が 235 のウラン原子核という意味です。ウランの原子核には質量数が 238 のものもあります。同じ元素の原子核でも質量数の異なるものがあるわけで、これらをまとめて同位元素といいます。元素を特徴づけるのは原子核のもつ陽子の数 Z で、これは原子番号とよびます。ウランの同位元素 ^{235}U と ^{238}U の原子番号は 92 です。原子番号を一緒に書きたいときには $^{235}_{92}$U などとします。

1.2　連鎖反応と原子爆弾　核分裂が発見された頃はちょうどドイツでナチスが台頭してきた、あるいはイタリアや日本でファシズムが台頭してきたころで、それと不幸にして時期が重なってしまった。核分裂が非常に大きなエネルギーを発生させることがわかってきまして、それは爆弾に使えるのではないかと言われはじめた。

1938 年の 8 月ですが、ドイツ軍がポーランドに侵攻しまして、第 2 次世界大戦がはじまりました。翌年の 8 月、A. Einstein は「最近、物理学で核分裂という新しい発見があった。それを使ってすごい威力のある爆弾をつくるという試みをドイツがしているらしい。アメリカも急いで研究しなければいけない」という手紙を F.D. Roosevelt 大統領に出したのです。Roosevelt は早速、ウラン諮問委員会をつくりました。その委員会は「本当にそうだ。アメリカも急いで研究すべきだ」という答申を出した。

1940 年になりますとイギリスでも、核分裂と言った Frisch と理論物理学者の Peierls の 2 人が「濃縮ウランを使えば超爆弾ができる可能性が高い。ナチスが台頭してきているので、イギリスの政府もその研究をぜひ始めるべきだ」と提言しました。濃縮ウランというのは、こういうものです。ウランという元素には原子量がおよそ 238 と 235 の 2 種類があります。これらを同位元素といい、それぞれ ^{238}U, ^{235}U と書くことは前にお話しましたが、これらが自然界にはそれぞれ 99.274%, 0.720%の割合で存在します（本当は ^{234}U もありますが 0.005%です。当時、これが知られていたか、存在率が何ケタ知られていたかは、知りません）。核分裂するのは Bohr が指摘したように ^{235}U の方で、あとで説明する連鎖反応（爆発）をおこすには ^{235}U の割合を増してやらないといけない。これを ^{235}U の濃縮というのですが、濃縮すれば爆発がおこるだろうということを Frisch と Peierls が初めて指

摘したのです。

1.3　日本では　核分裂発見のニュースを聞いた京都大学の荒勝文策が、核分裂の際いくつかの中性子がこぼれ出るはずだと考えて萩原篤三郎に実験させ、実際、1 回の核分裂で平均 2.6 個の中性子が出ることを見出しました。何個の中性子が出るかは、核分裂が連鎖的におこるかどうかをきめる重要なパラメータのひとつです。

こういうことです。陽子の多い、大きい原子核では陽子同士の反発力で原子核が爆発してしまわないように中性子で薄めています。陽子の多い原子核では中性子の割合も大きい。たとえば ^{235}U では陽子 92 個に対して中性子が 235 − 92 = 143 個もある。粒子総数 235 の 60.9%です。より小さい原子核、たとえばバリウムでは ^{141}Ba ですと陽子の数は 56 ですから中性子は 85 個で、粒子総数の 60.7%です。酸素の原子核の陽子の数は 8 で ^{16}O と ^{17}O がありますが、粒子総数に対する中性子の割合は 52.9%にすぎません。ですから核分裂で小さい原子核ができると中性子があふれ出す。これは予想されたことです。

同じく核分裂のニュースを聞いた仁科芳雄も --- 仁科先生と言わなければいけないのかもしれませんが、呼び捨てにします、お許しください --- さっそく実験をはじめました。ただ Hahn と Strassmann は中性子を、ウランに当てる前に水を通してわざわざ中性子の速度を落としてから、ウランに当てたのに対して、仁科は彼のサイクロトロンを使ってつくった速い、Hahn と Strassmann の中性子より何百倍も速い中性子を直接ウランに当てたのです。そうしたらウランの原子核が真っ二つに割れた。これを対称核分裂といいます。これに対して Hahn と Strassmann の場合は核分裂とはいってもウランの原子核が質量にしておよそ 3 対 2 くらいの大きい核と小さい核に割れたので非対称核分裂といいます。

仁科の実験に使われたサイクロトロンは 1937 年 4 月に完成した、いわゆる小サイクロトロンですが、仁科は大サイクロトロンの建設もしていました。しかし、どうしても思うように働かないというので 1940 年 8 月に矢崎為一ら 3 名をアメリカの E.O.Lawrence のところに派遣して助言を求めました。そのとき矢崎らは自分たちの対称核分裂の発見を伝えたのです。アメリカの物理学者はびっくりして早速、追試をしたそうです。矢崎らはアメリカ各地をまわって対称核分裂の話をし、大歓迎を受けました。すでにアメリカでは原子爆弾の研究をはじめていて、Lawrence の研究室にも秘密のヴェイルがかかっていたのですが、矢崎らは親切に教えてもらうことができました。日米開戦まで 1 年 4 ヵ月というときです。

1.4　日本における原爆研究　その同じ頃ですけれども、仁科は安田武雄・陸軍航空技術研究所長に偶然ばったり出会いまして、「核爆弾というものができるかもしれない。ついては、私の実験室でその開発の実験を始める用意があるけれども、どうですか」と言った。ほぼ外国と同じころ、日本でも核爆弾ができるということを考えていたのです。この安田・陸軍航空技術研究所長という人は、実は仁科と同じ岡山の出身でありまして、しかも仁科と同じ東大の電気工学科の出身で、顔見知りであった、たぶん親しかったのでしょう。

安田は早速、部下に命令しました。「仁科が核爆弾ということを言っている。少し調べてみてくれないか。」このころは東大に限らない、京都もそうかもしれませんが、軍の兵隊を委託学生といって大学で勉強させるという制度がありまして、この安田の部下にも委託学生として東大で物理を学んだ人がいたわけです。その人に安田は調査を命じた。その部下は「核爆弾はできそうです。ウラニウムが必要ですけれども、これは日本でも見つかるかもしれません」という報告をした。そこで安田は理研の当時の大河内正敏所長に原爆の研究を委託したのです。大河内は部下の仁科に「軍の委託だ。原爆の研究をしてくれ」と告げた。ということで日本の原爆研究が始まったのです。それが 1941 年で、その年の暮れには、御存じのとおり太平洋戦争がはじまっています。

ここまでの経過で特徴的なのは、米、英、日のどれも最初に物理学者が政府なり軍なりに対して原爆の研究をしなければいけないといったことです。

1942 年に海軍の伊藤庸二という人、やはり電気工学者で海軍の技術研究所の人ですが、「原子核破壊による動力実現は近き将来においては望み薄だが、実現性皆無に非ざる故、研究の萌芽を積極的に援助すべき」と考え、その検討をするような委員会をつくってくれないかと仁科にもちかけました。これは軍の側からの申し出です。ただし「爆弾」ではなく「動力」といっています。

仁科はその前に陸軍の安田から委託されているのです。そのことを考慮したのかとも思うのですけれども、仁科は「せっかく物理学者が集まって委員会をつくるんだったら、原子力に限らず、どういう方向の研究が軍にとって必要かというもっと一般的なことをまず話し合ったほうがいいのではないか」といいまして、その結果、物理懇談会ができた。第一回の会合は 1942 年 7 月で、出席した学者は

長岡半太郎、仁科芳雄、西川正治、嵯峨根遼吉、日野寿一、水島三一郎

浅田常三郎、菊池正士、渡辺 寧、仁科 存

でした。数次の会合の後、大勢は「米国と雖も今次の戦争中には恐らく原子力活用の実現

は困難ならむ」という意見で「電波兵器に力を注ぐべきだ」として解散しました。

一方で、安田・陸軍航空技術研究所長からの委託は生きているわけで、仁科は木越邦彦という人に UF_6 というウランとフッ素の化合物、これは気化しやすいという理由から原子力の研究に不可欠な化合物ですが、それをつくる研究を依頼しました。

それから、竹内 柾という人に分離筒をつくることを命じました。分離筒というのは ^{235}U を濃縮するための装置です。この装置に UF_6 のガスを入れて濃縮する。

もう１人、玉木英彦という理論物理学者に原子爆弾の理論を任せました。実は仁科も、どうも原子爆弾を主として考えていたのではなくて、原子炉といいますか、原子力といいますか、原子エネルギーを使ったエンジンをつくるということの方をむしろ主として考えていて、ことによると原子爆弾もできるかもしれないという姿勢でおられたようです。玉木は原子炉の理論をやったのです。

1943 年に陸軍に研究の状況の報告書を仁科は出していますが、原子エネルギーを使ってエンジンをつくるという形で原子力の利用をするためには、濃縮をそんなに高める必要はなくて、10%ぐらいまで濃縮すれば十分である。10%に濃縮したウランが 10kg ぐらいあれば連鎖反応がおこると報告しています。その後につけ加えるようにして、爆弾もできるかもしれないと書いているのです。同時に、原子エネルギーの利用を実現するためには、ひどく大仕掛けな工場が必要だ、また大きな電力が必要だといっています。日本では無理ではないかと言っているような感じもします。

それに対して安田は --- 先ほどは研究所長でしたが、このころには航空本部長に昇格していて --- これは重要な研究であるから航空本部の直轄研究にして、戦争で資材がいろいろ苦しいけれども、優先的に資材を回そうという約束をします。実はその約束は余り守られなかったようですが・・・。仁科の核エネルギー研究は「ニ号研究」と名づけられました。

1944 年になりますと、長岡半太郎という、当時の物理学界の長老、物理学界の牽引役でもあった人ですけれども、その人が「核分裂を兵器に利用するなど、できるはずがない」という論文を書きました。それがどのくらい影響があったか、よくわかりませんけれども、仁科にしろ、先ほどの物理懇談会に集まったそうそうたる物理の先生方にしても、みんな原子爆弾は今度の戦争の間にはできないと思っていたようです。

この年、UF_6 という化合物ができた。それから、分離筒も一応できた。ところが、分離筒の中に UF_6 のガスを入れると、分離筒の壁と非常に強く化学反応をして、みんな壁に

くっついてしまう。ですから、分離筒が濃縮の役目をしないのでした。UF_6 が強く化学反応することは分かっていたのです。そのため分離塔はニッケルでつくるべきだったのですが、手に入らず、銅でつくったのでした。

そうしているうちに、日本の各地でアメリカの空襲が盛んになって、理化学研究所も空襲されまして、1945 年に分離筒が焼けてなくなってしまいました。関西のほうに分離筒をつくろうという動きもあったのですが、結局、二号研究はここで中止になったのです。その年の 8 月に広島、長崎に原爆が落とされました。

これが大雑把な歴史ですが、これから個々の話題について時間の許す限りお話してみようと思います。

2. 核分裂の発見

核分裂の発見は、中性子をウラニウムに当てると、何か新しい元素ができるということからはじまりました。とにかく放射性をもった元素ができる。

最初に Hahn と Strassmann は、これはラジウムだと考えた。その理由は次のとおりです。新しくできた元素をバリウムと一緒に結晶化させると、結晶の中に放射能が集まる。ということは、新しくできた元素 X は、周期律表でいってラジウムと同じ属に属する元素であろう。ここに書きましたが、ラジウム、バリウム、ストロンチウム、・・・、こういうラジウムと周期律表で同じ属に属する元素に違いない。同じ結晶の中に集まるのだから、化学的な性質が似ているはずだというわけです。

B
Mg
Ca
Sr
Ba
Ra
Ba と同族の元素

もう一つは、この元素はウランに中性子をぶつけてできたので、ウランから周期表の上で非常に遠い元素、例えば、カルシウムとか、マグネシウムとか、そんなものができるはずはなくて、ウランに近い元素だろう。そう考えると、ラジウムが一番近いわけです。ですから、新しくできた元素 X はラジウムであろう。

ラジウムというのは、中性子 n をウラン U に当てますと、トリウム Th ができて、それが α 崩壊して、もう 1 回 α 崩壊するとラジウム Ra になります:

$$n + {}^{238}_{92}U \rightarrow {}^{235}_{90}Th + \alpha$$
$$\hookrightarrow {}^{231}_{88}Ra + \alpha$$

こういうふうに 2 度 α 崩壊が続いてラジウムができたのだろうと Hahn と Strassmann は最初は考えました。

とにかく、どんな元素ができたかというのは、そんなに多量にできるわけではないので、化学的に調べるのは難しい。しかし、ラジウムができたとしますと、いま言いましたように、α 崩壊を 2 度続けなくてはならない。これまで、そういう崩壊をする元素はなかった。α 崩壊しますと、その後は、たいてい β 崩壊するのです。

決定的な実験は次のようなものでした。Hahn たちは Ba と元素 X の混合物を水に溶かし、$BaBr_2$ を少しずつ加えました。すると $BaBr_2$ の結晶が析出するのですが、もし溶液に Ra が含まれていたら、それが $BaBr_2$ と一緒に析出することが分かっていました。ところが析出した結晶と溶液が含む元素 X の割合を X の放射能を測って比べても差はありませんでした。さらに $BaBr_2$ を加えても、結果は同じでした。Hahn たちは、念のために溶液に ^{228}Ra（当時はメソトリウム $_1$ とよばれていました）を加えて同じ実験をしてみました。この場合には予想どおり結晶の方に ^{228}Ra が多く出てきました。この実験は分別結晶法とよばれますが、元素 X が Ra でないことを決定的に示しています。Hahn たちは、かつての共同研究者 L.Meitner にこの結果を報せました。Meitner はユダヤ人であるとされ、ナチスのドイツから逃れてスウェーデンに移り住んでいたのです。

Hahn と Strassmann は実験についての彼らの論文の題を「ウラニウムを中性子で照射したとき生ずるラジウムの同位元素について」から「・・・アルカリ土類元素について」に変え、こう書いています。「ウランに中性子をあててできた新しい元素 X は、化学者としてはラジウムではなくてバリウムであると言わなければならない。しかし、物理学者としては、今日までのすべての経験に矛盾する飛躍をすることはできない」彼らは核分裂とは言えなかったのです。

Meitner から返事がきました。「核物理学は今まで驚きに満ちていた。だから、ウランからバリウムができることを否定する必要はないのではないか」

1928 年に G.Gamow という物理学者が原子核の液滴モデルを提出していました。液滴モデルというと、普通 Bohr を考えるのですが、Gamow が最初に言ったのです。Meitner は考えました。もし原子核が水滴のようなものだとしたら、中性子を当てると、そのエネルギーをもらって原子核が振動をはじめ、そして 2 つにちぎれるということもあっていいのではないか。

$_{92}U$ に中性子を当てると、2 つの原子核に分裂する。その 1 つは $_{56}Ba$ だ。そうすると、92 とか 56 というのは、これら原子核がもっている陽子の数ですから、もう 1 つの原子核は --- この反応では 2 つの原子核のほかはせいぜい中性子しか出ないとすれば --- 陽子を

92–56 = 36 個もつことになる。これはクリプトン $_{36}$Kr だ。前にも言いましたが、$_{92}$U とか $_{56}$Ba とか元素記号の左下に書いたのは、その原子核がもつ陽子の数です。原子番号ですね。これに対して原子核の質量数は左上に書きます。$^{235}_{92}$U のようになるわけです。

原子核の質量公式といって、いろいろな原子核のもつエネルギーを表す式があります。エネルギーを表すのが質量公式だというのは変なようですが、Einstein が言ったようにエネルギーと質量は同じものなのです。それは表 1 に書いたような式ですが、エネルギーの単位は MeV（ミリオン電子ヴォルト）、すなわち 100 万ヴォルトの電位差で加速したとき電子の得るエネルギーです。A というのは原子核の質量数で、原子核のもつ中性子の数と陽子の数の和です。それから Z というのは、原子番号といいますけれども、原子核がもっている陽子の数です。

原子核の質量公式は、原子核のエネルギーは 3 つの項から成り立っているといっています。細かいことをいえば、もっとたくさんの項があるのですが、今は 3 つとしておきましょう。まず、$-14A$ という項は、原子核のもっている粒子の数に比例する部分です。1 粒子当たり − 14MeV。マイナスがついているのは、粒子数が増すと、それだけ原子核のエネルギーは下がるからです。原子核の粒子たちは、お互いに引力を及ぼし合って結合しているわけですから、エネルギーが下がる、粒子数が多いほど下がるのです。

しかし、原子核の表面にある粒子たちは引力を片側、原子核の内側からしか受けません。外側には粒子がいませんから、内側からしか引力を受けない。それだけエネルギーの下がりが少ない。この補正、表面張力の補正といいますが、これが質量公式の最後の項です。原子核の表面積が質量数 A の 2/3 乗に比例するので、$13.1A^{2/3}$ となっています。

質量公式の第 2 項は何かといいますと、これは原子核のもつ陽子が、静電気をもっているために、お互いに反発するエネルギーです。これは原子核のもつ陽子の数 Z の 2 乗に比例します。A の 1/3 乗は原子核の半径に比例し、一様に帯電した球の電気的エネルギーは球の半径に反比例しますから、陽子が反発するエネルギーの総和は $A^{1/3}$ に反比例します。

この質量公式を使ってウランの原子核の分裂前後のエネルギーを考えてみます。分裂の前と後で全体の粒子数は同じですから、質量公式の第 1 項は考えないでよい。原子番号 92 のウラン原子核で、質量数を 238 としますと、クーロン斥力のエネルギーが 820MeV になります。表面張力による項は 500MeV。合わせて 1,320MeV です。これが、もしバリウムとクリプトンに分かれたとしますと、原子番号がバリウムは 56、質量数は 150 ですからエネルギーの和が 710MeV になります。クリプトンのほうのエネルギーは 430MeV

表１　質量公式で見た核分裂

核分裂:　原子核の液滴モデル、G. Gamow (1928)

$$^{238}_{92}\mathrm{U} + \mathrm{n} \longrightarrow ^{150}_{56}\mathrm{Ba} + ^{88}_{36}\mathrm{Kr} + \textbf{neutrons}$$

質量公式 (1935)　$\Delta Mc^2/\mathrm{MeV} = -14A + 0.60\dfrac{Z^2}{A^{1/3}} + 13.1A^{2/3}$

原子番号	質量数	クーロン斥力/MeV	表面張力/MeV	合計
92	238	820	500	1320
56	140	360	350	710
36	85	180	250	430

$$1320 - (710 + 430) = 180\,[\mathrm{MeV}]$$

クーロン斥力：　56　36　$\dfrac{5}{3}\cdot 0.6\dfrac{Z_1 Z_2}{{A_1}^{1/3} + {A_2}^{1/3}} = 210\,[\mathrm{MeV}]$

になります。それを足して、ウランのエネルギーと比べますと

E_1 = 1320MeV −（710 + 430）MeV = 180MeV

となって 180MeV だけ余るわけです。

つまり、ウラニウムに中性子を当てると、２つに割れたほうがエネルギーが低くなるということです。ですから、ウランの原子核は中性子を当てるとエネルギーを 180MeV だけ出して２つに分かれる。

２つに分かれる途中では原子核が振動するのですけれども、その間に真ん中がくびれて、ついに２つの球に分かれる。 表 1 の最後に書きましたが、1 つは陽子の数が 56 個の球、もう一つは陽子 36 個をもつ球という２つの球が接触した状態になるでしょう。陽電気の球と陽電気の球ですから、反発力のエネルギー E_2 があるわけです。それを計算してみますと、質量公式のクーロン・エネルギーの部分を借りて、表１の下部に書いた計算により、

このエネルギーは

$$E_2 = 210\text{MeV}$$

になることが分かります。この計算式のあたまに5/3という因子がつけてあるのは、質量公式のなかの静電エネルギーは有限の半径の球に対するものですが、いまは球の中心に電荷が集まった2つの点電荷の間のエネルギーが問題だからです。

実はこういう計算はMeitnerと、先ほど名前が出たFriscが一緒にやったのです。彼らはE_1もE_2もともに200MeVだと言い、ちょうど数字が合う。原子核が2つに分かれる条件をみたしているとした。こういう計算をしてMeitnerは、Hahnの実験は核分裂を見ているのだと結論しました。

核分裂発見のニュースはコペンハーゲンのBohrに伝わり、Bohrは1939年の1月にアメリカを訪問してこのニュースを伝えセンセーションをおこしました。このときPlaczekの出した疑問からBohrが核分裂するのはウランの同位元素のうち^{235}Uの方だと喝破したことは前にお話ししました。

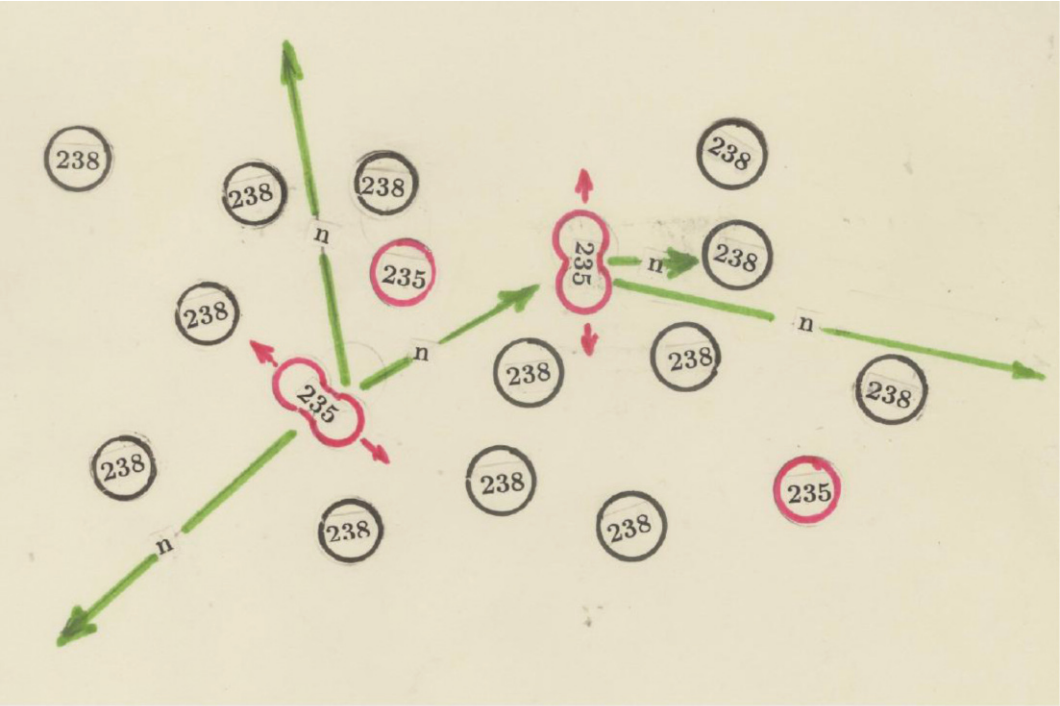
3. 連鎖反応

原子核が2つに分かれますと、表1の下部に示したように陽電気と陽電気の球がくっつき合っているわけですから、お互いの反発力ではじき飛ばされまして、非常に大きなエネルギーで飛び出すのです。200MeVという高いエネルギーで飛び出す。1molの^{235}Uはおよそ240gですが、6×10^{23}個の原子核を含んでいますから、仮に1molの^{235}Uが核分裂したとしますと

$$200\text{MeV} \times (6 \times 10^{23}) = 10^{32}\text{eV} = 2 \times 10^{13}\text{J} = 5 \times 10^{12}\text{cal}$$

のエネルギーが発生します。これは爆弾に使えるのではないかと多くの人々が考えるようになりました。

爆弾に使うというとき、核分裂に際して中性子が出るということが重要です。ウラン原子核に中性子を当てたら核が振動をはじめ、分裂してE_1という大きなエネルギーと一緒に中性子が出る。その中性子が近くにいるウランの原子核にぶつかって、また大きなエネルギーと中性子を出す。もし中性子が2個とか3個とか出ますと、この繰り返しで核分裂の数がネズミ算的に増えます。これを連鎖反応というのですが、つまり爆発です（図1）。核分裂するのは^{235}Uですから、中性子がうまくこれに当たるようにする、そして^{238}Uに当たると吸収されてしまうかもしれないので、これは避けなければならない。それには



中性子は、散乱をくりかえして、さまよい歩く。ときに核分裂、ときに吸収、ときに外へ：拡散

図１　^{235}U の核分裂の連鎖反応

^{235}U の割合を高くし（つまり ^{235}U を濃縮し）、しかも ^{235}U の塊が小さいと中性子がすり抜けて外に飛び出してしまいますから十分に大きな塊にしておく必要があります。連鎖反応がおこる最小の塊の大きさを臨界量といいます。核分裂のときこぼれだす中性子が何個かによって臨界量が左右されるので、これも非常に重要な問題になります。

ここで 1943 年に跳びますけれども、陸軍の核爆弾の研究委託に応えるためでしょう、玉木が連鎖反応について仁科研究室の面々を前に講義をしました。仁科、矢崎為一、竹内柾、宮島龍興といった面々、このうち宮島は理論家です。玉木が、やはり水とウランを混ぜた系で、中性子を水で減速してからウランに当てるという考えですが、濃縮度が 10% 程度のウラン 10kg くらいの塊があれば連鎖反応が起こると言いました。後で玉木は、これはソ連の Zeldovich の論文にある数式に手近にある数値を入れただけで、何もオリジナルなことはないといっています。

1943 年 3 月 31 日までの研究をまとめて仁科と矢崎為一が陸軍航空技術研究所に提出した報告書が残っています。そのほかに「連鎖反応の必要およびそれの実現を妨げる因子」、

「ウラン原子核分裂連鎖反応の条件中に含まれる因子の決定に就いて」という無署名の長大な計算ノートもあります。

その報告書によると、彼らは酸化ウランと中性子の減速材としての水の混合物からなる球（半径 R）を考え、中性子をウランの分裂から生ずる 1MeV のものと減速された熱中性子の 2 群に分け、それぞれの密度 F, F_θ に対して拡散方程式を書き、原点に中性子を発生する源があるとして、その定常解を求めています。定常解だというので爆弾とは関係ないかと思うと、すぐ後で、爆発の時間を 10^{-2} 秒と求め、これが中性子の減速時間 10^{-4} 秒より長いからというのだろうと思いますが、定常解からの結論を爆弾にも適用しています。

この定常解は、球の半径 R がある値 Rc のとき無限大になるので、これが核分裂の連鎖反応だと彼らは言います。Rc を小さくするには、水を混ぜない方がよいのですが、そうすると連鎖反応のためには（濃縮していない）ウラン 40 トンが必要になり「資源的に見て実用価値小なり」というわけで、ウランと水の混合物にもどり、ウランと水の最適の混合比について表 2 のような結果を報告しています。

表 2 の一番左にウランの濃縮度が書いてあります。これが 2％であったらば、水 1 ℓ に対してウランは 1,600g、すなわち 1.6kg 必要で、それを集めてみると大きさが半径 37cm ぐらいの球になります。そして、その集まりをつくるためには、原料としてのウランは――濃縮する前のウランですが、0.8t 必要だと。そういう計算をして報告したわけです。

このとき、1 個のウラン原子の分裂で放出される中性子の数は何個であるかというのが非常に重要なわけですけれども、多分 2 個か 3 個で「あろう」と言っています。実は京都大学では萩原徳太郎という人が中性子の数の実験をしまして、平均 2.6 個であるという答を 1939 年に出しています。それから、E. Fermi と L. Szilard もこの実験をして、ほぼ同じ答えを出していました。こういう実験は知らなかったのかどうか、いま必要、重要なことは、この ^{235}U を少量なりとも濃縮して、分裂に際して中性子が何個出るかを確定することだ。これがないと、この表は確定しないといっています。ウランを濃縮する方法の研究が重要だというのです。

ここまでは原子力エンジンをつくる話なのです。それに言い添えるかのように、爆弾として用いられる可能性もあるということを言っているのですが、そのためにもやはりウランと水の混合物を使う。水というのは、速い中性子が水の分子にぶつかって減速されるのです。中性子が ^{235}U に衝突して核分裂をおこさせる確率は、中性子のエネルギーが約

表２　仁科と矢崎の陸軍航空技術研究所への報告（1943 年６月）

U_3O_8 と水との混合物（$\nu' = 3$ とした）

U235 の濃縮度 (%)	水 1l に対するウランの量 (g)	R_c cm	濃縮されたウランの量 (kg)	原料としてのウランの必要量 (ton)
100	40	15.5	0.6	0.087
50	90	16.6	1.7	0.12
10	350	20.9	10.6	0.15
2	1600	36.7	278	0.78

1 個のウラン原子の分裂、放出される中性子 平均 $\nu' = 2 - 3$ 個なるが如し,

萩原篤太郎 (京大) の実験 (1939), 中性子は平均 2.6 個,

Fermi - Szillard (1939) も.

ウランを大量に濃縮する方法の研究、緊要なり.

ウランを少量なりとも濃縮して ν' の値を確定する必要.

1/10eV と小さいとき大きいのです。核分裂の確率が大きければ連鎖反応をおこす ^{235}U の濃縮度は小さくてよい。ところが中性子が水の分子に衝突することを繰り返して十分に減速されるまでの時間は、１回の衝突に要する時間を平均 10^{-4} 秒としますと、玉木が算出した臨界量 10kg の濃縮ウランの ^{235}U が全部核分裂するのに 10^{-2} 秒ぐらいかかる（表３の反応時間）。その間ウランの塊を飛び散らないようにしっかり包んでおかなければならない。これは大変なことです。いや、臨界量だけのウランを包み込んだのでは、連鎖反応が進むとウランの量が臨界量を割ってしまい、連鎖反応が止まってしまいます。仁科は、臨界量の２倍を包み込むことを考えていたようです。

アメリカの原子爆弾では速い中性子をそのまま使っていました。その代り、^{235}U の濃縮度を上げなければなりません。

この表３で混合物の質量はウランを元素として計算していて、実際に使う U_2O_8 とはしていない。放出される熱量は、１個の ^{235}U の核分裂で出るエネルギーを 200MeV とすれば、たとえば濃縮度 10%の場合、表２から水１ℓ に対してウラン 350g の割合で混ぜるという

表３　ウランと水の混合物。臨界量と発熱量と反応時間

爆弾として用いられる可能性あり.

ウランと水の混合物、熱量と反応時間

U 235 の濃縮度 (%)	混合物の重量 (kg)	放出される熱量 (10^{13} カロリー)	反応時間 (10^{-2} 秒)
100	16.2	1.2	0.8
10	42	2.1	1.1
2	500	11.0	2.8

中性子が弛緩される時間を平均 10^{-4} 秒として計算.

混合物の重量は、ウランを元素として計算. U_3O_8 とすると 18%重い.

10^{13} カロリーは火薬 1 万トンの熱量にあたる.

火薬の威力は発生する瓦斯による. ウランの場合は水が高温度になる.

爆発の過程は理論的な考究を要す.

のだから

$$\left(4.2 \times 10^4\text{g} \cdot \frac{350}{1000 + 350} \times 0.1\right) \cdot \left(\frac{6.0 \times 10^{23}\text{個}}{235\text{g}}\right) \cdot \left(200 \times 10^6 \frac{\text{eV}}{\text{個}} \cdot \frac{1.6 \times 10^{-19}\text{J/eV}}{4.2\text{J/cal}}\right)$$

と計算され 2.1×10^{13}cal となって表３の値に一致します。10^{13}cal は火薬１万トンにあたる。火薬の破壊力は発生するガスによるのですが、原子爆弾の場合は水が超高温になることによるのでして、この爆発の過程は理論的な考究を要するとしています。

仁科たちは、ウランと水の混合物を爆弾として利用するためには頑丈な鉄の箱に入れて、ウランが多少爆発したぐらいでは飛び散らないようにしておかなければならないと考えていました。その鉄の量は膨大で、爆弾としては非常に不便だろう。運べなくなってしまいます。だから、原子力は爆弾として使うよりはエンジンとしてその辺に装置を置いて使う方がよかろうと書いております。

1943 年 7 月には、仁科は東京第二造兵廠に報告をしています。航空技術研究所の了解をとった上のことです。多少くりかえしになりますが、仁科の考えていたことがよく分かると思いますので、要約しておきます:

①ウランを実用化することとなれば大仕掛けの工場が必要になる。電力も莫大である。

②ウランを爆薬として使用する場合、水と混ぜる。

③ウランを実用するには基本質量 10kg を常に存置する。10kg 以下では放出された中性子は自然に消滅し連鎖反応にいたらない。

④ ^{235}U を発動機に利用するには発動機の構造を全く変更する必要があるので、直ちに実用化するのは困難である。一方、爆薬として利用するのは容易であるが、基本質量 10 kg を常に余分に必要とするので不得策だ。

さらに爆薬が不得策な理由は、^{235}U が水を分解し爆発威力の大きい温度になるまでに 1/20 ないし 1/30 秒を要し、その間 ^{235}U を保持するため強力な「ボンブ」を必要とする。ボンブの重量が甚大となるので適当でない。

仁科は、^{235}U の濃縮に用いる UF_6 がまだできないと言っています。

4. UF_6 をつくる

なぜ UF_6 をつくる必要があるかといいますと、^{235}U を濃縮するには、次にお話しますようにウランをガスにして使うのですが、ウランがガスになりやすいのは UF_6 の形にしたときなのです。この UF_6 は 56.5° C で昇華し、室温の蒸気圧は 1.33×10^4Pa です。

1942 年 8 月に木越邦彦という人が、仁科から UF_6 をつくる研究に誘われました。誘われたというのは、木越は、当時は東大の学生で、理研の飯盛研究室で卒業研究をしていたのです。そういう若い人に向かって「おまえは飯盛研究室でウランのことをやっているんだから、ひとつ私のところに来て UF_6 をつくる研究をしないか」といって誘ったわけです。

木越は、まずフッ素づくりからはじめました。酸性フッ化カリを溶融電解してフッ素を得ようとしたが不成功、東北大学の石川総雄から長時間電流を流し続けておけばフッ素が得られると教えてもらいました。

翌年の 7 月、1 年ぐらいたったときに、金属ウランが 27kg できた。陶器をつくる釉薬に硫酸ウラニウムが入っているのだそうで、陶器を焼いているところからビンを 100 本買ってきてウランを取り出したのです。そのころ仁科は、伊藤庸二に対してウラン動力源研究のためにフッ化水素などいくつかの化学薬品を手配してくれないかと頼んでいます。当

時は戦争中で必要な薬品がなかなか手に入らない、海軍の人に頼めば融通してもらえたということです。

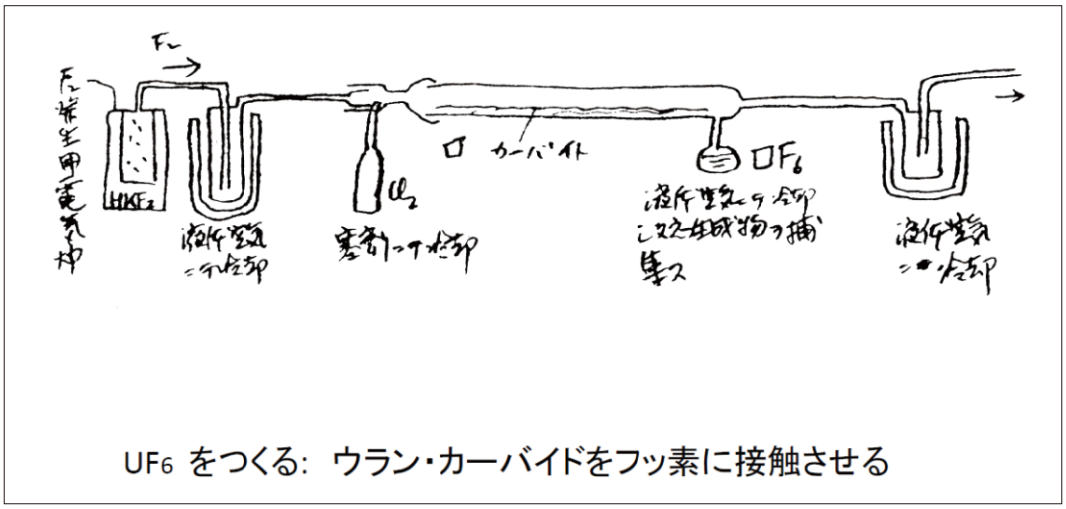
木越は、目標はフッ化ウランだというので、その金属ウランの上にフッ素を注いだ。そうしたら、爆発が起こって危うく視力を失うところだったという話があります。

どうしたら UF_6 ができるかというので大変苦労したようです。木越は「できません」といって仁科に怒鳴られたこともある。どうも日本の中の連絡が悪いのです。東北大学に行けばつくり方を教えてもらうことができた。まず炭化ウランをつくる。それにフッ素をまぜると UF_6 ができる（図 2)。できた UF_6 には F_2、HF、Si が混在しているので図 3 のようにして精製する。これを教わってきました。その炭化ウランをつくるには炭素が必要です。そこで、自分の家から奥さんの目を盗んで砂糖をこっそりもち出して、これを焼いて炭素をつくった。

日本の原爆研究がいかに家内工業的かということです。ウランにフッ素を注いだら爆発したとか、妻の目を盗んで砂糖をもってきたとか、家内工業的な研究であった。

1944 年 3 月になりますと、UF_6 をたくさんつくろうということで、陸軍航空本部から将校たちが来まして、生産がはじまりました。同時に、朝鮮と福島県でウランの鉱石を採掘しました。

もう一つ、ドイツから潜水艦でウランの原鉱を運んでくる。ただ、ドイツにも原子爆弾の研究をしているということは言わず、「ブタノール製造に触媒として使う」ため酸化ウ



UF6 をつくる: ウラン・カーバイドをフッ素に接触させる

図 2　UF_6 の製法

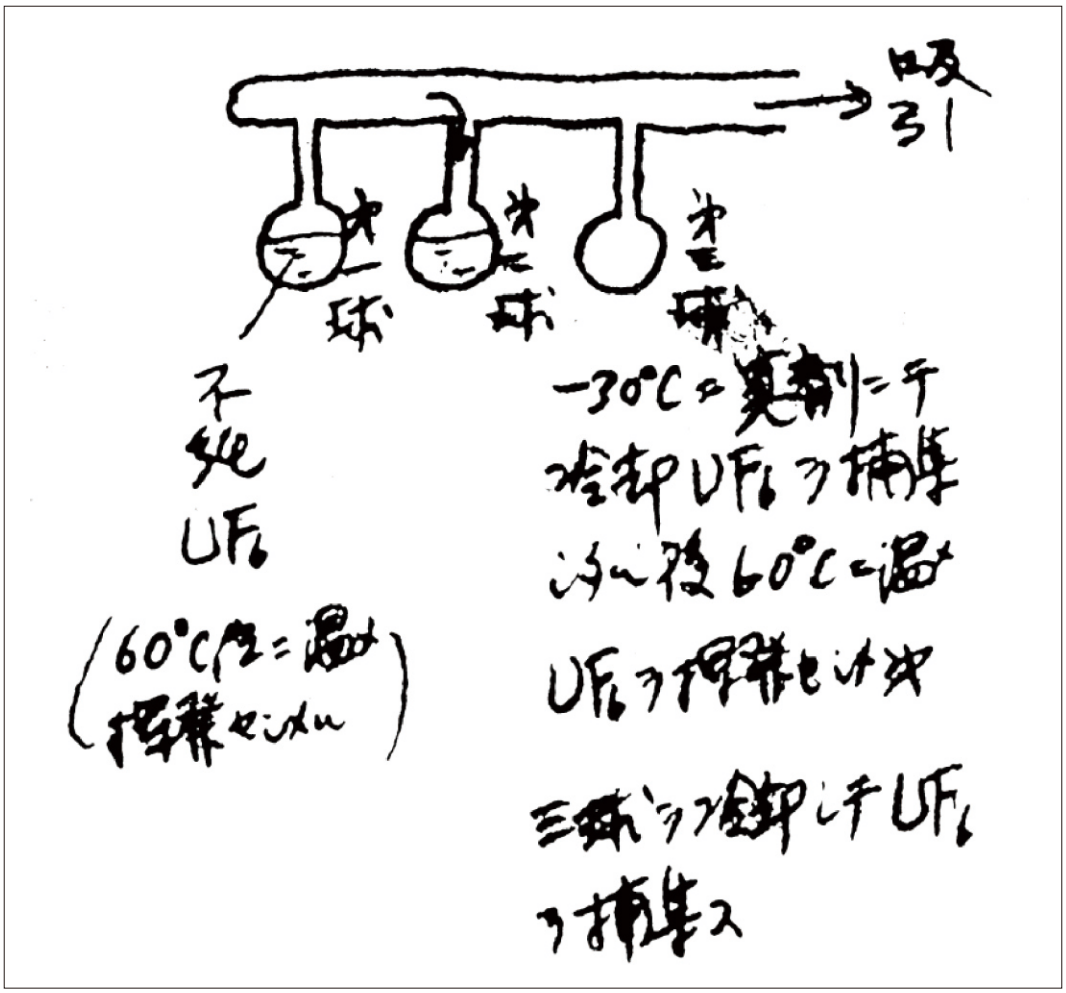


図３　UF_6 の精製

ランが必要だから送ってくれと頼んだ。ドイツは潜水艦２隻を使って日本に運ぼうとしたようです。そのうちの１隻は、アメリカ軍か、イギリス軍かの潜水艦に撃沈されました。きのうテレビでその撃沈される様子をやっていました。テレビでは水銀を積んでいたと言っていましたが、ウランの原鉱を積んでいたはずだと思います。もう１隻の潜水艦は、海の底を走っている間にナチスが降伏してしまったので、アメリカ軍に降伏したそうです。結局、潜水艦でウランを運ぼうとしたけれども、日本には届かなかった。

朝鮮でも大分たくさんの人を動員して掘ったようですけれども、日本には来なかったようです。

5. ^{235}U の濃縮

次にはその UF_6 を使ってウランを濃縮しなければなりません。1942 年 12 月、竹内柾という人がウランの濃縮担当を申し渡されます。「申し渡される」というのは、竹内が自分で日記に書いている言葉です。何となく「無理に命じられた。自分は嫌だけどやらなければならない」という感じがします。それは、竹内は、これまでは宇宙線として降ってくる湯川の中間子の質量を測るという実験をして成果を上げていました。質量を精度よく測ったのは世界最初です。この測定値が湯川の計算とよく合ったので、湯川の予言した中間子の実在が証明された。ですから、恐らくその実験をもっと続けたかったんだと思います。

仁科に命じられた ^{235}U の濃縮をするのに最初に検討したのが渦巻質量分析器。東大の宮本梧楼という人が発明した新しい質量分析器です。^{235}U のほうが ^{238}U より軽いのです。それら質量の違う原子核を分ける装置を質量分析器といいます。説明は省略しますが、これは大変うまい装置で、それを使って濃縮をしようと仁科は考えたのです。ところが東大の嵯峨根遼吉も同じようなことを考えていまして、悶着が起こったようです。

仁科研究室では 1943 年 3 月に濃縮法の再検討をしまして、これからお話しする熱拡散法を試すことにしました。ところが、これも竹内が自分で日記に書いているのですけれども、UF_6 という分子がお互いに及ぼし合う力の様子がわからないので、熱拡散法でどれだけ分離ができるか、不明である。分子間力がどうしてそんなに大事かというのは、これからお話しします。

それで、43 年 11 月になりまして、一応分離筒ができました。図 4 に示すような装置です。これは東京の駒込にあった理化学研究所の中につくりました。

図 4 は断面図で分かりにくいかもしれませんが、真ん中にあるのが銅の筒です。その筒の外径が 3.5cm。その周りをまたもう 1 つの銅の筒で囲んであります。その 2 つの筒の間隔が 2 mm です。その 2 つの筒の間に UF_6 のガスを入れる。そして、内側の銅の筒を 350 ～ 400℃という高温にする。外側の筒を 50℃という比較的低温にするのです。内側が熱くて外側が冷たい。こうすると、狭い 2mm のすき間の中で UF_6 の対流が起こります。これをうまく使うと、すぐ後で説明しますように、上の溜めに軽い $^{235}UF_6$ の分子が集まり、下の溜めに重い $^{238}UF_6$ の分子が集まるはずでした。

ところが、分離筒ができてみると、熱が均等に伝わっていないことが分かり、改修が終わったのが 1944 年 3 月です。そこで実験が始まりました。

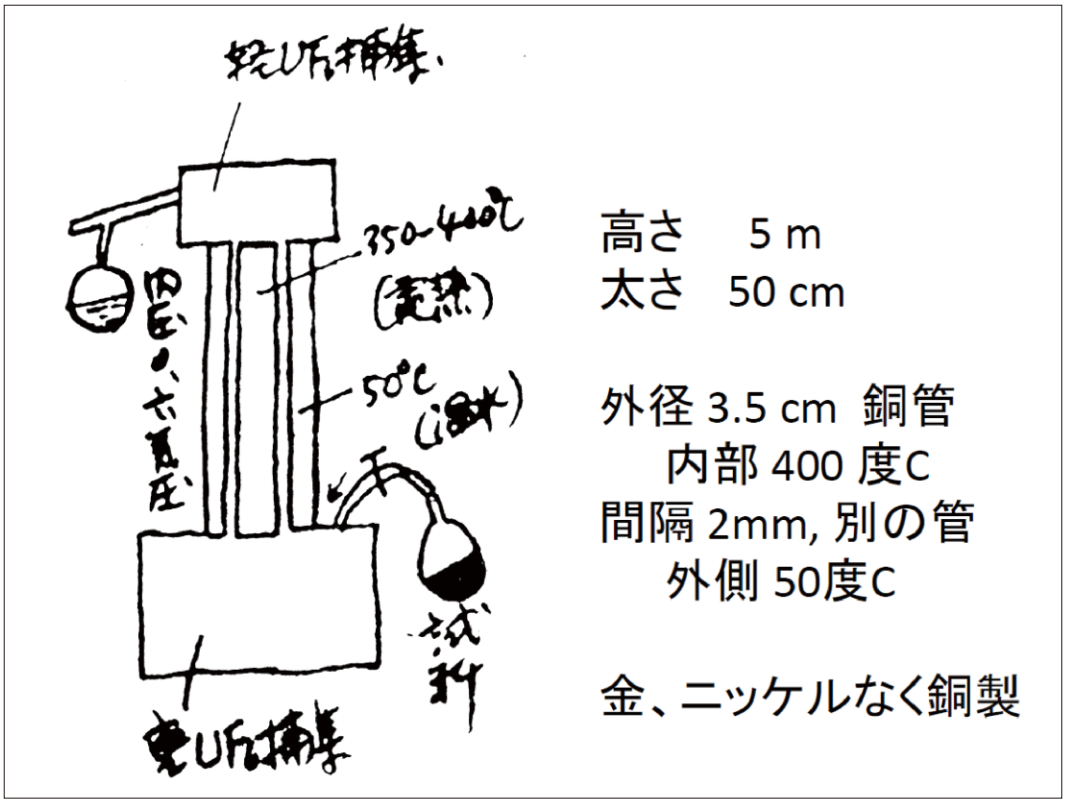


図４　ウランの同位元素を分離（濃縮）する分離筒

分離筒の原理を説明しましょう。図５を見てください。

数字が２列ずつ並んでいますが、左側の列が分離筒の高温側の壁、右側が低温側の壁のつもりです。分離の過程は、まず図５の左上からはじまります。全体に２と書いたのは、$^{235}UF_6$ 分子が２という量だけ分離筒の２本の筒の間全体に一様にあったという意味です。重い方の $^{238}UF_6$ は書きませんでした。軽い方だけ書いたのです。前に言いましたように、内側の筒を高温にして外側を低温にしますと、熱拡散という現象がおこりまして、軽い分子は高温側に集まる、重い分子は低温側に集まる。こういう差ができるのです。そうすると重い分子と軽い分子の分布は図５の下の段、最も左に書いたように変わります。

ただ、これは、先ほど話が出ました分子間力に非常に鋭敏でありまして、例えば、昔マックスウェルという人が最初に気体分子運動論というのをつくったんですけれども、彼の書いた方程式では、２つの分子のおよぼしあう力が分子の間の距離の５乗に反比例するような斥力の場合には簡単になって解くことができる。有名な話です。この簡単になる場合

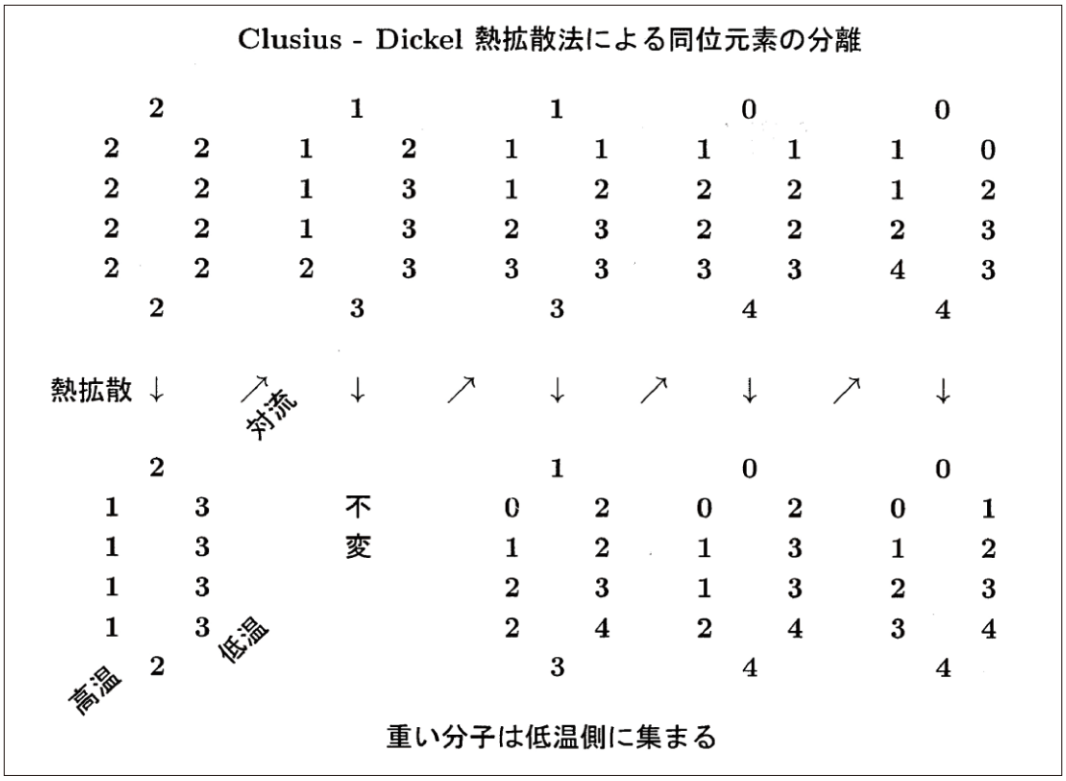


図５　熱拡散法の原理

重い分子の挙動を時間を追って示す。①最初は、上段の左端のように一様分布であるが、②熱拡散によりその下に移って低温側、高温側で差を生じ、③対流により斜め右上の図に移る。以下同様にして最後に右下の図にいたって変化が止まる。ウランの分離では、上にあつまった軽い ^{235}U を取り出す。

には、今いったような高温側に軽い分子、低温側に重い分子という分離がおこらないのです。

これが、分離が分子間力に敏感であるという１つの例です。竹内は、UF_6 分子がおよぼしあう力がよくわからないので、一体どのくらい分離できるか自信がないと書いていました。でも、分子間力を調べようという研究は誰もしなかったようです。戦争で余裕がなかったのかもしれません。

ですが、今は分離筒の原理を説明するために、上に言ったような分離がおこったとしましょう。ところが、こちら側が低温でこちら側が高温ですから、高温の側の気体は上に上がります。低温の側は下に下がります。対流です。対流がおこると、重い分子と軽い分子

の分布は上の段の左から2番目の図のように変わります。実は熱拡散と対流は同時におこるんですが、説明のために切り離して書きました。

このように熱拡散して対流して、熱拡散して対流してと繰り返すと、最後に下の段の一番右の図のようになって、以後は変わりません。一番下が溜めですが、そこには分子が、重い方の分子ですが4個が集まりまして、上の溜めには0個になりました。軽い分子は上の溜めに濃縮されたのです。上の溜めは一様分布の2からはじまったんですが、熱拡散と対流を続けたら下の溜めは4、上の溜めは0になりました。いま拡散筒の中の分布は4段しか書いてありませんが、もっと何段も重ねると、上下の差はもっと大きくなるでしょう。もっとよく分離（濃縮）できるということです。

もし、重い分子の代わりに軽い分子の分布を見たら、軽い分子は上の溜めに集まっていたでしょう。

これが熱拡散法の原理で、ドイツのK. ClusiusとG. Dickelという人たちが1938年に言い出し、塩酸ガスに応用して^{35}Clと^{37}Clのほとんど完全な分離に成功していました。その原理を使って^{235}Uを^{238}Uから分けよう、あるいは濃縮しようという装置を竹内がつくっていたのです。

1944年7月になって分離筒にUF_6の注入をはじめました。1944年11月、仁科が陸軍の技術研究所に行って報告をしていますが、UF_6が筒と化学反応をおこし、そこに食われてしまって分離どころではないと言っています。UF_6の化学反応性が高いということは、実は前からわかっていたことで、したがって、分離筒は金や、あるいはせいぜいニッケルなどを使ってつくらなければいけない。それは分かっていた。ですが、戦争中で資材がなくて、竹内はやむなく銅でつくった。そのためもあるのですけれども、UF_6が筒と反応して食われてしまった。

UF_6の注入は1回450gで数時間を要し、1944年7月から1945年の始めまで6回行なわれました。濃縮がおこったはずの試料は、分離筒の上の溜めから取り出して2時間化学処理して自然崩壊生成物を除去しUF_6を純化した上でサイクロトロンで中性子を当てました。

何故サイクロトロンかといいますと、ウランの軽い方の原子核からできた$^{235}UF_6$と重い方の原子核からの$^{238}UF_6$とが分離されたかどうか見たい。拡散筒の上と下の溜めからとってきて、上の方に軽いものが多いということを確かめたいのです。そのために実は質量分析計をつくる計画だったのですけれども、やはり資材が手に入らなくてできなかった。

そこで、とってきた試料にサイクロトロンで中性子を当てまして、そうすると ^{235}U の方は中性子を食って核分裂する、放射能をもった原子核ができます。ですから、中性子を当てて放射能がどれだけ強くなるかを見れば、^{235}U が濃縮されているかどうか分かる。

翌 1945 年 1 月、山崎文男が―やはり理研の原子核実験の人ですけれども、日記に「行き詰まった感あり」と。何に行き詰まったか、書いてないんですけれども、多分これは濃縮実験が行き詰まったということだろうと思います。

1945 年 3 月、やはり山崎の日記に「サイクロトロンで照射して放射能をはかる。濃縮なし」と書いてあります。上のような目論見で実験をしてみた。サイクロトロンで照射して放射能を測ってみたのですが、濃縮の効果は見えなかった。これが 1945 年 3 月です。

以後、空襲が激しくなりまして、分離筒が焼けてしまったのが 4 月です。一たんは仁科研究室の人たちが火を消したのだそうですが、多少残り火があったらしくて、朝、再び発火した。そのときは研究所の人たちはもう火を消しに行く気力がなかったと日記に書いています。

東京は駒込にあった分離筒が焼けた後、鈴木辰三郎という軍の人が、関西で分離筒を建てようとしたのですけれども、うまくいきませんでした。

5 月にもサイクロトロンで放射能を測るテストをしましたが、やはり結果は否定的で、濃縮はおこっていないということになりました。

そこで研究室で相談して、ニ号研究は中止になりました。陸軍の技術研究所に「中止するけれどもいいですか」と問い合わせたところ、陸軍は「敵国側でもなし得ざること判明したので中止は了承します」と言ったそうです。われわれにできないことは敵国にもできないというのでしょう。

1945 年 8 月に広島と長崎に原子爆弾が落ちました。

尻切れの感じがしますが、お話はこれで終わりにいたします。

参考書

山崎正勝『日本の核開発：1939 ～ 1955　原爆から原子力へ』、績文堂（2011）、
中根良平・仁科雄一郎・仁科浩二郎・矢崎裕二・江沢洋編
『仁科芳雄往復書簡集』、第 III 巻（2007）、補巻（2011）

核開発年表

年	月	
1932	7	ドイツ、ナチス総選挙で第一党
1933	1	A. Hitler、政権掌握
		日本、ドイツ、国際連盟脱退
1938		K.Clusius - G. Dickel、熱拡散による同位元素の分離法
1938	9	ドイツ、ポーランドに侵攻、第二次世界大戦
1928	12	O. Hahn - F. Strassmann、n+U to Ba 生成を確認
1939	1	E. Frisch - L. Meitner、n+U to 核分裂と見抜く、核の液滴モデル
		N. Bohr アメリカへ、核分裂のニュース伝える
	2	G. Placzek　U による中性子捕獲は 25eV にピーク、核分裂にはピークなし
		N. Bohr　核分裂するのは希少な U-235 だと推測
	2	E. Fermi - L. Szilard　核分裂の際、高速中性子が射出される
	4	アメリカ、核分裂関連の論文発表を自主的に控える
	8	A. Einstein、F. D. Roosevelt 大統領に書簡、核爆弾の可能性、ドイツは研究に着手？
		10 月まで大統領には届けられなかった
	10	Roosevelt、ウラン諮問委員会、Szilard、Fermi、Wigner、Teller 参加
	11	諮問委員会が報告書、極めて強力な破壊力をもつ爆弾
1940	2	O.R. Frisch と R. Peierls、濃縮 U による核爆弾、イギリス政府に提言
	7	ある夏の日、仁科、安田陸軍航空技術研究所・所長に「ウラン爆弾製造の実験に着手の用意あり」仁科と安田は、同郷、安田は東大電気学科の後輩　安田は部下の鈴木辰三郎に調査を命じた　鈴木は、士官学校を出て東大・物理に依託学生
	8	武田栄一　熱拡散による同位体の分離、数学物理学会誌に総合報告
	10	鈴木、報告 : 原子爆弾は出現の可能性、ウランは我が国にも埋蔵？
1941	4	武田、理研の大河内に原爆製造の研究を依頼、大河内は仁科に
	11	海軍技術研・伊藤庸二　次の戦争には原子爆弾と称すべきもの出現？
	12	太平洋戦争
1942	3	伊藤庸二、報告「原子核破壊による動力実現は近き将来には望み薄だが実現性皆無に非ざる故、研究の萌芽を積極的に援助すべき」
	夏	伊藤庸二、仁科に「核物理に海軍技術への応用あり得るか」検討委員会つくりたい。委員長にと懇請。
	6	仁科返事「目的を核物理に限定しない。伊藤、名称を「物理懇談会」7 月より数次の会合 : 長岡半太郎、仁科芳雄、西川哲治、嵯峨根遼吉、日野寿一、水島三一郎、浅田富三郎、菊池正士、渡辺 寧、仁科 存
		結論「米国と雖も今次の戦争には恐らく原子力活用の実現は困難ならむ」電波兵器に力を注ぐべし、として解散
	8	木越邦彦、仁科からフッ化ウラン研究に誘われる

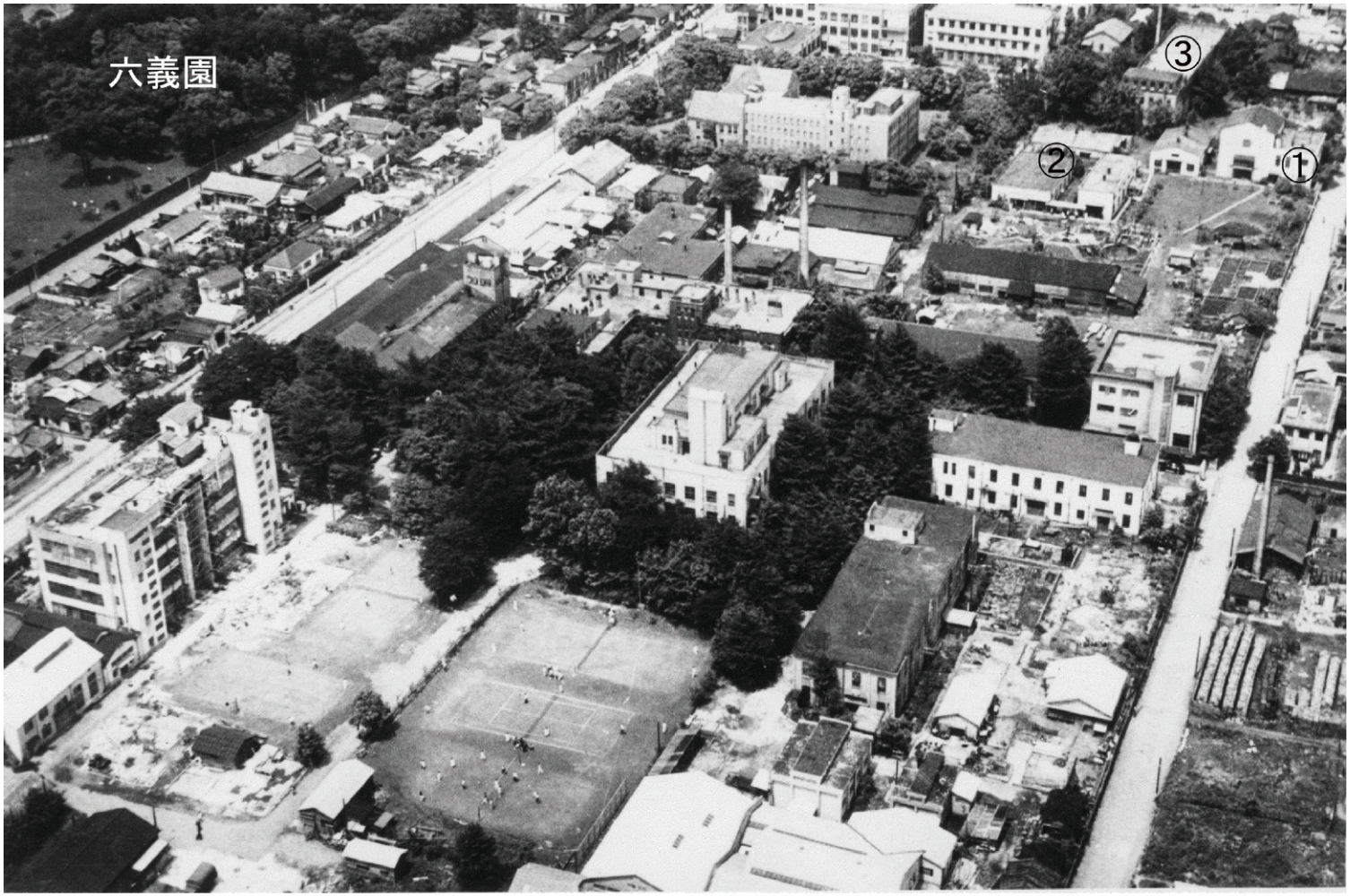
	12	竹内 柾、仁科よりウラン研究担当を申し渡された
1943	1	玉木、連鎖反応につき拡散の式など示し理論を講義、仁科、矢崎、竹内、宮島龍興
1943	1	J. Chadwick から Bohr に、あなたの援助が最大の助けとなるある特別な問題
		Bohr の返事 . 原子物理学の最近の発展を利用することは不可能
	3	同位元素の分離法を検討、熱拡散法にきめる。分子間力が不明なので、どの程度どのような分離をするか不明
1943	4	東京陸軍第 2 造兵廠研究所報告、U-235 に関する研究は必要、促進。U-235 を分別製造することが目下の重要なる課題
		・矢崎為一は仁科とともに U 原子崩壊の研究、米学会も注目
		・U.S.Naval Inst. の報告 : 仁科が U-238 を U-235 に変換成功
		世界におけるウラン鉱石の産額は年約 4 万トン、大部分、米国
		日本では、福岡県安真木村、福島県石川町付近、岐阜県恵那郡苗木地方
		陸軍航空技術研究所、A.Settbacher がアメリカの新聞に超爆弾の報道ありと
		水がエネルギーの発生源となるとは全く解し得ず
		安田、東条英機から原爆開発の指示を受ける
	6	仁科・矢崎　核分裂によるエネルギーの利用、陸軍航空技研に報告
	7	U 研究打ち合わせ、東京陸軍第 2 造兵廠研究所
		東京第 2 陸軍造兵廠の信氏良吉少将（所長）、石田栄技師に
		（研究委託を受けている航空本部の了承を得て、報告）
		実用となれば大仕掛けな工場を要し莫大な電気を食う
		在ベルリンの陸軍に電報「ピッチブレンドを日本に輸送する可能性は ?」
		仁科ら、航空本部と研究資材の供給を打ち合わせ
	9	安田、仁科の研究を航空本部直轄に、「ニ号研究」
	11	竹内、分離塔完成しかし加熱が一様にならない改修が必要
1944	1	木越、フッ化ウランできた（ウラン・カーバイドとフッ素を接触）
		カーバイドつくる砂糖は妻の目を盗んで、後にデンプンを使う
1944	2	仁科、U 研究報告、フッ化ウラン、未だできず、発振管得難く中性子発生も
	3	フッ化ウラン、生産はじまる
	6	飯盛里安、朝鮮でウラン鉱石を採掘、300kgのウランを得る
	8	陸軍行政本部、福島県石川町、酸化ウラン 500g 採取を決定
	11	仁科、U 研究報告、フッ化ウランを分離塔に入れた。壁に食われて行方不明
	12	長岡半太郎　原子核分裂を兵器に利用する批判、誤解
1945	3	山崎文男・中根良平、分離塔からの試料、サイクロトロンで照射、分離の兆候なし
	4	空襲で分離塔焼失
	5	山崎、サイクロトロンによる分離テスト、negative である
		酸化ウラン積んだドイツ潜水艦、ドイツ降伏により米軍に投降
		ニ号研究、中止

6　陸軍、「敵国側においてもウランのエネルギー利用は当分なし得ざるものと判明したので、研究中止も不可ならず」として了承

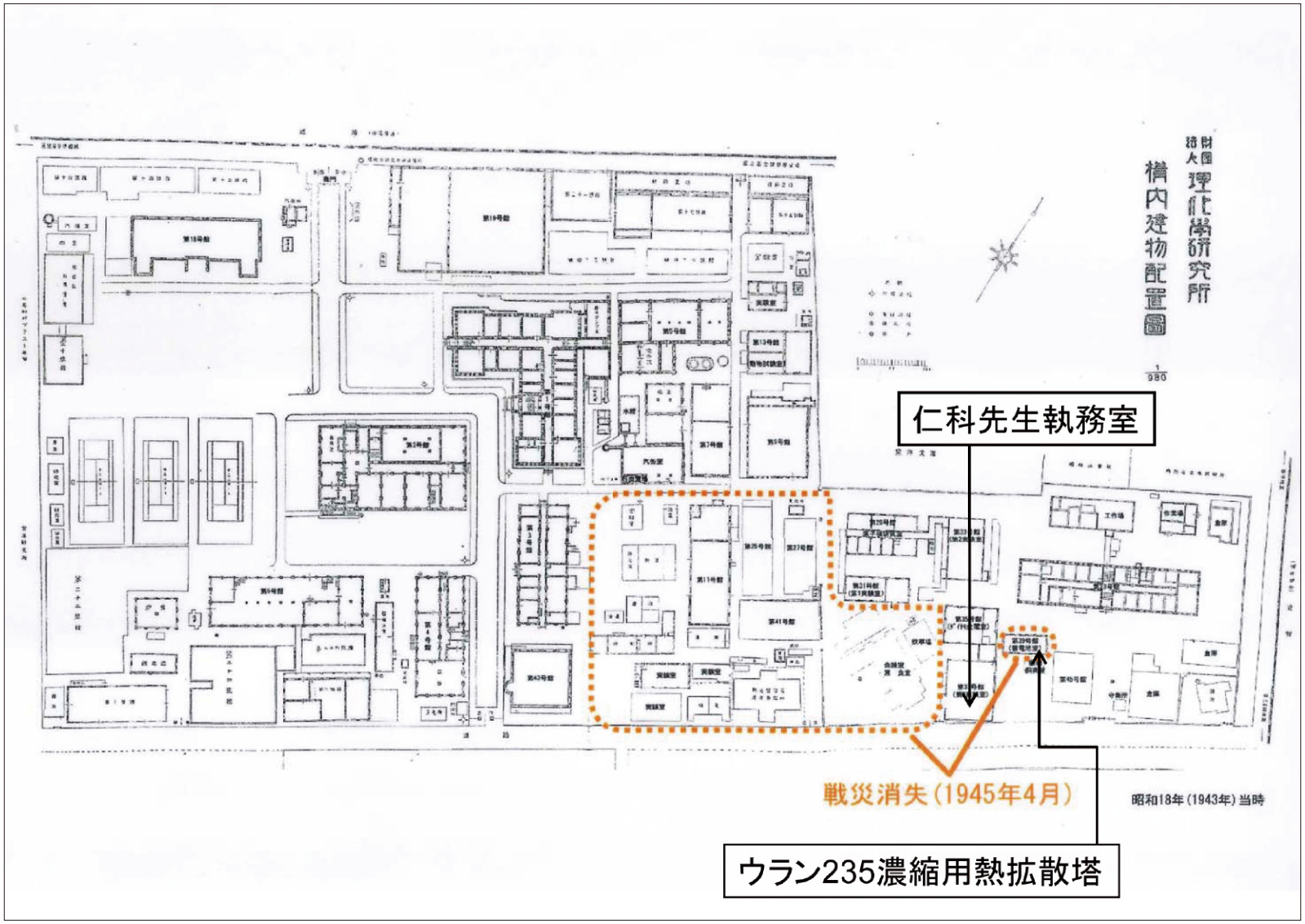
司会　江沢先生、どうもありがとうございました。

きょうお手元に、「仁科芳雄博士往復書簡集」全3巻（2010年度日本科学史学会特別賞受賞）と補巻のチラシをお配りしてあります。補巻は昨年11月に刊行されたばかりでございます。全部合わせますと大体2,500ページぐらいになりますので、相当ご興味のある方しかお読みにならないかもしれませんが、このチラシにも短い文章ではありますが結構内容のあることが書いてありますので、どうぞご参考になさってください。

それでは、江沢先生、どうもありがとうございました。



（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）


財團法人 理化學研究所
構内建物配置圖
1/980
仁科先生執務室
戦災消失（1945年4月）
昭和18年（1943年）当時
ウラン235濃縮用熱拡散塔

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 編
矢崎裕二・江沢 洋

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

［初版 2006/07］

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　では、続きまして、現在の話でございますが、日本アイソトープ協会常務理事の井戸達雄先生から、「アイソトープの医学利用 :Mo-99 問題など」という題でお話をいただきます。

皆様、御存じのように、19 世紀の末にエックス線と放射能がレントゲンとベクレルによって発見されて以来、これらのエックス線、放射能はすぐに医学や医療に利用されるようになっていまして、現在も進化を続けております。

井戸先生は、先進医療としてよく聞かれる PET で体の断層写真を撮る際に用います、放射性フッ素 ^{18}F をラベルした FDG という放射性医薬品の開発者でもいらっしゃいます。

それでは、先生、お願いします。

「アイソトープの医学利用 :Mo-99 問題など」

井戸 達雄（日本アイソトープ協会常務理事）

「アイソトープの医学利用」ということで現在のお話をということでございます。協会のモニュメントにもしてございますが、仁科先生たちがこのサイクロトロン（図 1）［註］と同型の小サイクロトロン（日本初）を戦前に建造され、これで割合早い時期（1940 ～

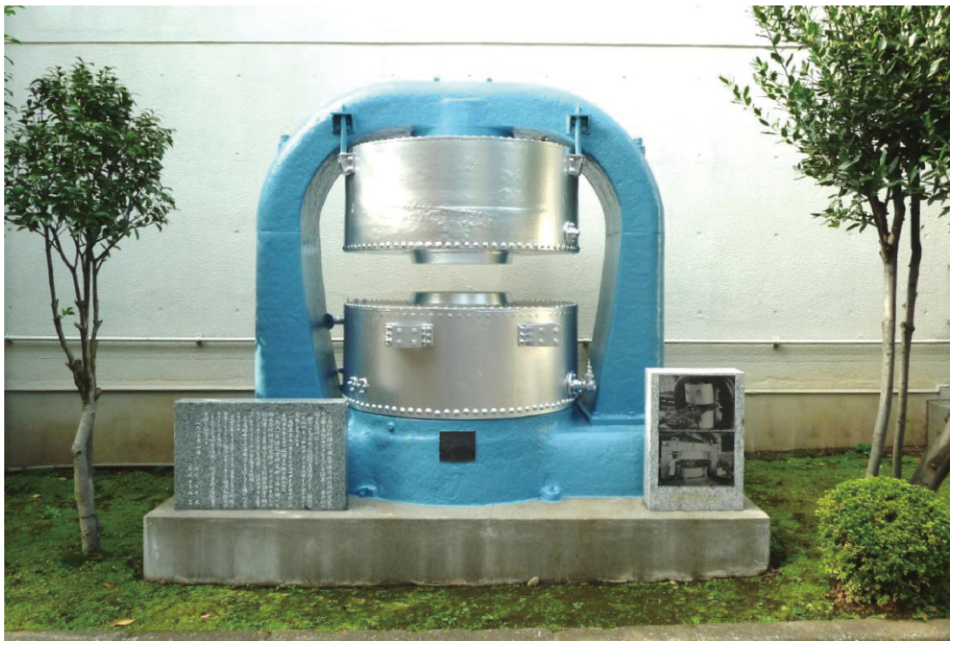


図 1

1945）にラジオアイソトープをお作りになり、製造したラジオアイソトープを生体に投与して、それが生体内でどのように動くかというお仕事をなさった。これは言ってみれば、現在、私たちが病気の診断に使っています核医学という分野がございますが、そのまさに草分け的な仕事であったと考えます。［註］仁科博士が亡くなった後、サイクロトロンの発明者であるE. ローレンスが理研を訪問し、小サイクロトロンと同型の磁石が残っているのを見て再建を手助けし1952年に完成。理研が和光市に引っ越すまでラジオアイソトープの製造に使用された。加速箱は国立科学博物館に展示されている

放射線ならびにラジオアイソトープの医学利用の場合に、まず診断応用、それから治療応用がありますが（表1)、診断応用では体内にラジオアイソトープを入れて、それから出てくる放射線をとらえて画像を形成し、体内の画像診断を行う。これは生体内のラジオアイソトープの動態、いわゆるトレーサーとしての利用になります。また、体外診断として、体内からは血液や尿などいろいろとりだせるわけですけれども、その中に入っている微量の生体物質を分析する手段として利用しております。これは放射能をはかるという高感度分析が行われております。

治療のほうとしましては、体の中に放射線源を入れて、そこから出てくる放射線を局所に当てて治療をするという方法があります。これは体内照射治療と申しますが、それはアイソトープの体内の分布と関連するわけです。また、体の外から粒子線を当てて照射治療するという医学利用も行われております。

今日は特に診断利用の、生体内でアイソトープが分布する状態を見る、ここを中心にお話を進めていきたいと思っております。

放射線・アイソトープの医学利用		
• 診断応用	体内画像診断	生体内動態
	体外診断	微量分析
• 治療応用	体内照射治療	生体内分布
	粒子線照射治療	

表1

ラジオアイソトープの製造（表2）でございますが、まず仁科先生たちが行ったように、加速器でつくる方法と原子炉中性子によってつくる方法とがございます。加速器では荷電粒子を使いますので、大抵の場合は陽子過剰になりまして、ポジトロン（陽電子）を出すような、そういう核種が多く作られます。ここでは例として炭素 ^{11}C、窒素 ^{13}N、酸素 ^{15}O ができる反応を示しております。今日話の中心にします フッ素 ^{18}F はネオン ^{20}Ne をデューテロン d でたたいて作

っております。原子炉中性子の場合にはいわゆる中性子吸収で作りまして、例えば、医薬でしたらコバルト ^{60}Co、イリジウム ^{192}Ir などが使われます。また、先ほど話がありましたように、フィッションでできた核分裂生成物の中でストロンチウム ^{90}Sr、イットリウム ^{90}Y、モリブデン ^{99}Mo、テクネチウム ^{99m}Tc ―これも今日のお話の中心にしますが―セシウム ^{137}Cs、ヨード ^{131}I などが医学で使われております。

ラジオアイソトープの製造

- **加速器（サイクロトロン）による方法**

  ^{14}N(p,α)^{11}C　^{16}O(p,α)^{13}N

  ^{14}N(d,n)^{15}O　^{20}Ne(d,α)^{18}F

- **原子炉（中性子）による方法**

  ^{59}Co(n,γ) ^{60}Co　^{191}Ir(n,γ) ^{192}Ir

  ^{235}U(n,fission) ^{90}Sr/^{90}Y, ^{99}Mo/^{99m}Tc

  ^{137}Cs, ^{131}I

表 2

加速器で作った場合には、ポジトロンを放出する核種が多くなるのですが、こういった医学の画像診断の場合に、ポジトロンの利点がございます。

模式的に描きましたが（図 2)、陽電子放出核種から放出されたポジトロンと近傍のエレクトロンが対消滅いたしますと、ちょうど 180 度の反対方向に 2 本のフォトン（ガンマ線）が出てきます。これをオブジェクトの周りにずらりと並べた多数のガンマ線ディテクターで、ちょうど対向にあるものがコインシデンス（到達時間が一致）するような、そういうイベントを選んで、その両端を結ぶ直線を描いていきますと、それらが重なったところがもともとポジトロン放出核種が多かったのだろうということが言えるので、このオブジェクトの断面の放射能部分が見られることになります。

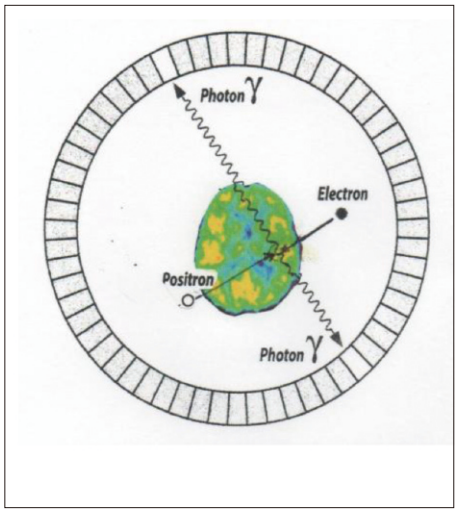


図 2

もう一つは、放射線がそのオブジェクトを通過する際に、物質によって放射線は吸収されますが、それがこの直線上のどこにあっても吸収率はいつも同じですから、一旦この形さえ決めて、その質量なり密度が決まってくれば、非常

に正確に減衰補正した画像を得ることができます。

こういう二つの利点がございまして、検出器の発達とともにポジトロンを放出するような核種が医学で使えるようになっております。これがPET（ポジトロン・エミッション・トモグラフィー）になるわけでございます。

ここには（図3)、先ほど矢野先生から御紹介いただきましたが、FDGで撮った画像を示しました。やはりPETの画像で3次元的にデータを収集いたしまして、それを体の軸方向にスキャンしますと、このようにいろいろな角度から輪切りの像を取り出すことができます。

後でお話ししますが、FDGというのはグルコースと同じような動きをしてくれます。グルコースの代謝の多いところほど集積が多いということで、例えば、グルコースをよく使っております脳、心臓などにFDGが集積しているのがわかります。また、腎からも排せつしますから膀胱にたまっているのがわかります。脳の中で特にエネルギーを盛んに使っているところほど集まります。こういった神経細胞の多い灰白質に強く集まりますし、軸索の多い白質の部分は減っているという形になっています。このような画像から診断をしていくわけでございます。

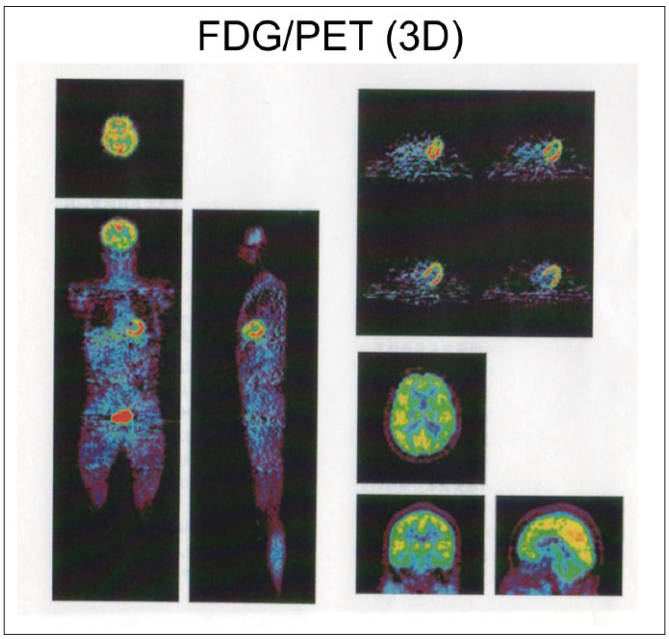


図3

それではFDGというものはどんなものか。グルコースの構造をここに（図4）示しますと、FDGというのはこの2の位置のOHのかわりにフッ素Fが入っている、そういった化合物でございます。また2の位置のOHのかわりにHが入ると、これはデオキシグルコースです。フッ素が入ったので、デオキシ－2－フルオログルコース、これを言いやすかったので、適当に私はFDGというふうに、語呂よくつけてしまったのですが、DFGというのが本当だろうと思

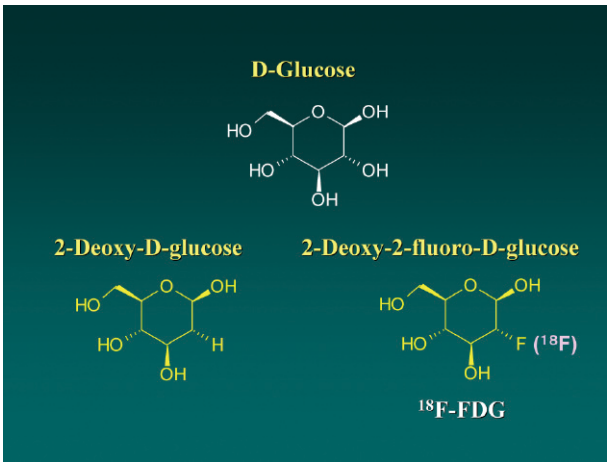


図 4

います。このフッ素のところにフッ素 ^{18}F でラベルしたのが、フッ素 ^{18}F の FDG でございます。

この化合物は実際に生体内でどのように代謝されるかをグルコースと対比して見ていきます（図 5）。デオキシグルコース及びフルオロデオキシグルコースでございますが、グルコースと同じように血中から、血管の細胞膜を通って細胞の中に入ってまいります。このときにトランスポーターが関与します。特にここ（細胞膜）を通す仕組みがあるのですが、グルコースもデオキシグルコースもそのトランスポーターの基質となりまして、細胞の中に入ってまいります。

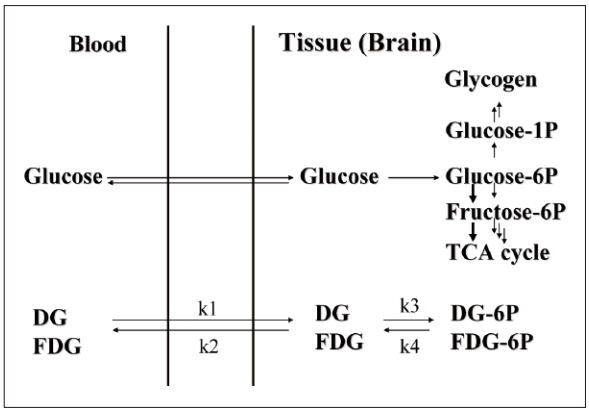


図 5

細胞の中に入ってまいりますと、ヘキソカイネース、グルコカイネースとか、グルコースを代謝する酵素によって最初のステップのグルコ－6－燐酸に変わります。グルコースの場合には、さらに関連する酵素によって次々にこう（矢印）行って、最終的には TCA サイクルで入って炭酸ガスと水に代謝されていくわけです。それから、肝臓には燐酸の位置が変わって 1－燐酸になってグリコーゲンとして肝臓に蓄えられます。脳ではこれはありません。

ところが、デオキシグルコース及びフルオロデオキシグルコースの場合には、グルコースと同じようにここ（細胞膜）は通るのですけれども、細胞の中に入ってヘキソカイネースでもって燐酸化がまず進行します。ここまでは一緒です。この先の酵素が 2 位の OH を認識します。2 位の OH がなくて、H がついたり、フッ素がついたりしますから、（矢印

のように行かないで）ここでとまってしまうわけです。実際には非常にスピードが遅くなります。少しは進むのですけれども、とまってしまうと言っていいぐらいになります。

そうしますと、血液、細胞の中の FDG と FDG-6P の 3 つのコンパートメントにだけアクティビティがあるということがわかります。こういった状態でもし血中のラジオアクティビティを逐次的に計測すれば、ある程度のダイナミックな測定を行うことによって、この 3 コンパートメントを数学的に解けば、k1、k2、k3、k4 とここに一応書きましたが、これらの速度定数を全部算出することができます。この辺がグルコースをラベルするのではなくて、ちょっと化学形変えたところにラベルしたのがミソでございます。

これによってグルコースの代謝スピード、つまりヘキソカイネースの活性度を求めることによって、その生体でのグルコースの消費量を計算することができるということです。

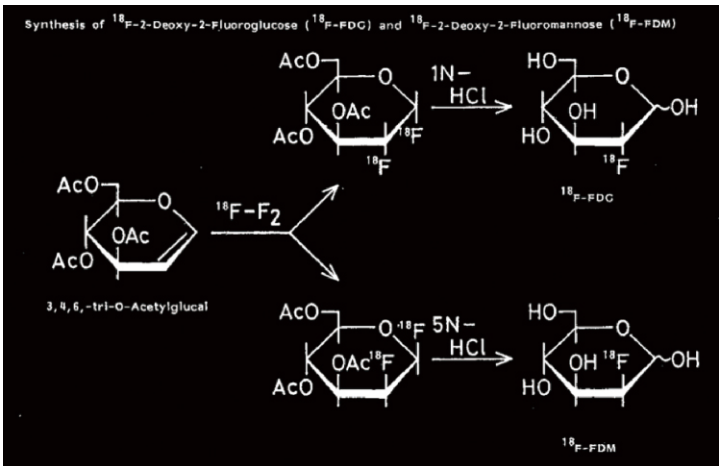


図 6

次にこの化合物をつくるにはどうするかというと（図 6)、一番簡単な方法として、二重結合にフッ素を導入いたしまして、この 2 つの異性体を分けて、必要なところを加水分解しますと、この 2 の位置のフッ素が安定にそのまま残って、こちらの 1 の位置だけが加水分解されて OH にかわります。このようにして FDG はできるわけですが、それをこのようなプロセスで進行させます。

このフッ素につきましては、先ほど話しましたように、ネオンにデューテロンを当てフッ素 ^{18}F をつくるという方法を選びました（表 3)。理化学研究所で研究していたときにこの方法をとっていたものですから、この方法が楽だったということです。ターゲットガスとしましては、フッ

• Nuclear Reaction	$^{20}Ne(d,\alpha)^{18}F$
• Target Gas	$Ne + F_2$
• Chemical Reaction	Electrophyric Ins.
• Purification	Gas chromatography
	Liquid chromatography

表 3

素を導入しますから、どうしてもキャリアのフッ素が必要なので、キャリアのフッ素ガスをネオンにまぜて照射いたします。反応としましては、ダブルボンドにインサーションさせるというような方法です。反応した後、この化合物を精製するのにはガスクロマトグラフィーや液体クロマトグラフィーを使って分離するということにいたしました。

まず、ネオンとフッ素の混合ガスをデューテロンでたたいて効率よく ^{18}F を含むガスを取り出さなければならないわけですが、どうしてもビームの投入位置のところのガス密度が低くなりまして、収量が減ってしまいます。したがって、それを防ぐためには圧力をかけてやる必要がある。それから、フッ素を使いますので、先ほどの江沢先生の UF_6 の話ではございませんが、器壁にそれがトラップされてしまって出てこないようでは困る。そういう点を考慮するために、特にフッ素に強いニッケルないしはモネルの金属を使いまして、しかも高圧に耐えるようなチャンバーをつくりました（図7）。前面のフォイル（B、C）のところもかなり厚めのフォイルを使っています。ただし、ニッケルを厚くしてしまいますと、ビームがそこでエネルギーロスしてしまいますので、アルミと薄いニッケルとをラミネートしたような、そういうフォイルになっています。

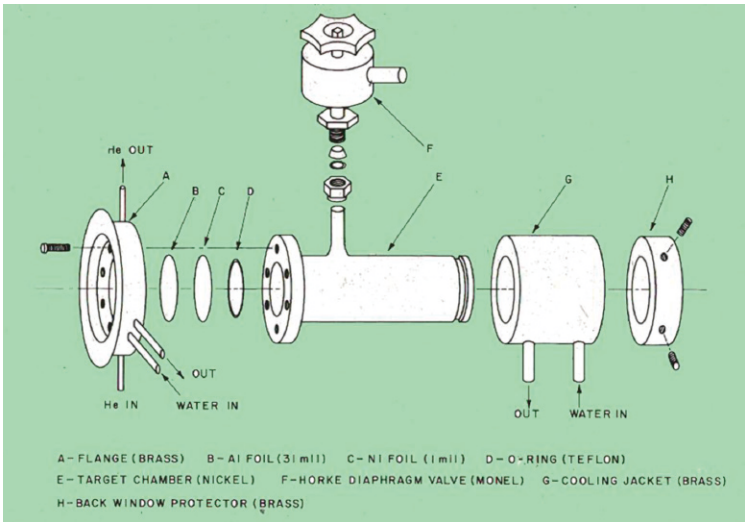


図7

ニッケルでつくった容器の中を鏡面状態に磨いてもらったのですけれども（図8）、さらにそれを不活性化するためにフッ素を入れたガスを封入しまして、外側を600℃ぐらいに加熱してや

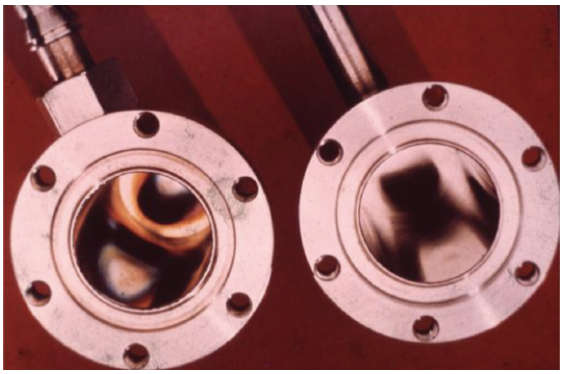


図8

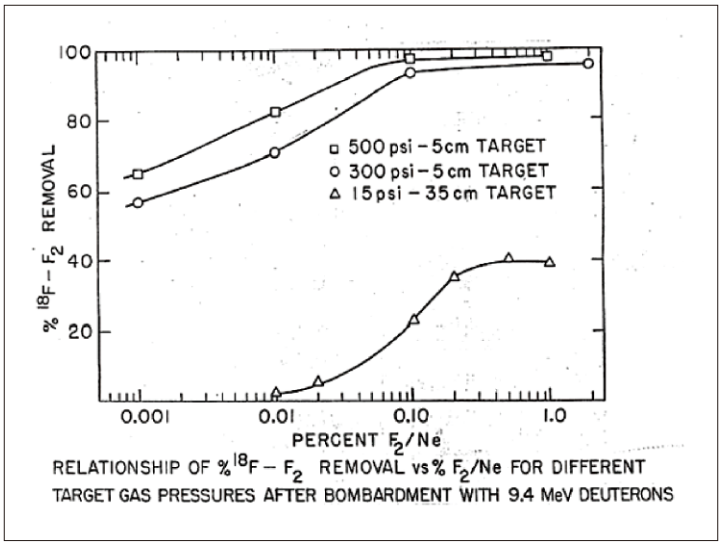


図 9

ります。そうすると、容器表面で反応するようなフッ素はそこにくっついてきます。そういう状態にしてから照射するという形をとります。

中に入れる圧力と取り出し効率には相関がございまして（図 9)、圧力を高くしてやればやるほど回収率が上がってまいります。それから、当然、チャンバーの長さが短いほど回収率は良いということであります。入れるキャリアのフッ素の量が多ければ多いほど効率良く出てくるわけですけれども、余りキャリアを多くしたくないので、どのぐらいまでフッ素濃度を下げられるか。大体 90%近くに回収率で取り

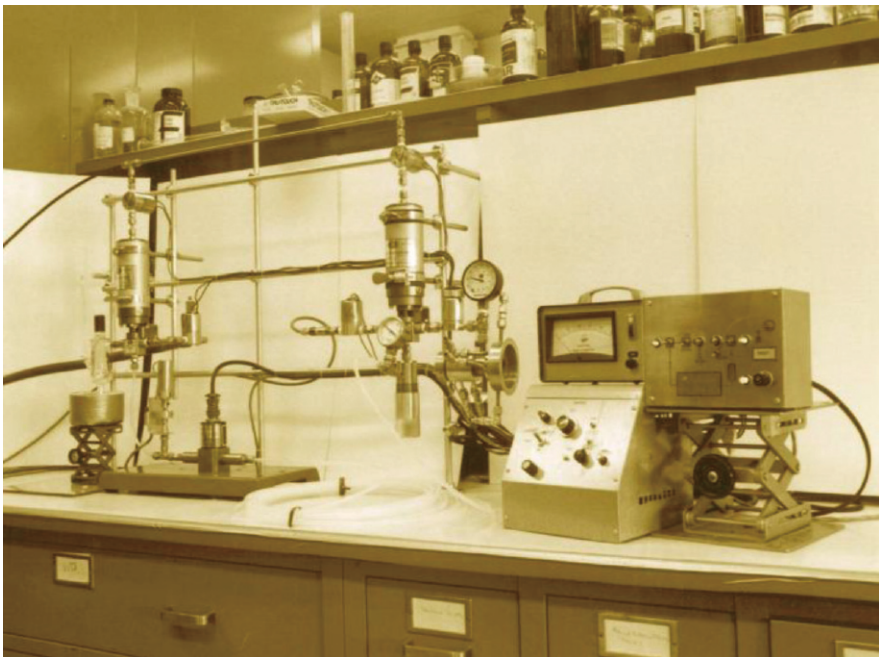


図 10

出すためには、ネオンに対して0.1%ぐらいフッ素を入れれば良いということがわかりましたし、圧力については大体20気圧ぐらいかけてやれば良い。5 cmぐらいのターゲットで20気圧ぐらいかけてやりますと、90%を超えて回収できます。こういう条件で製造することにいたしました。

装置それ自体ですが（図10)、ターゲットがここに（右側）ありまして、こちらは（左側）反応槽です。この間にコンクリートの壁がくるわけですが、リモートコントロールで操作します。高圧用のバブルもつけまして、実際の製造に当たったわけです。

FDGを合成しまして、製品についての動物実験、安全性のテスト、無菌性、人に投与する予定でございますから、そういったことをすべてチェックした上、1976年8月16日に（表4）―今から36年前ですけれども、ちょうどこのときはアメリカは建国200年記念だったのですが、場所はブルックヘブンでございますが、ブルックヘブンで初めて、臨床応用のFDGをつくりましてヒトへ投与したわけです。ただし、ブルックヘブンにはPETカメラがなかったので、カメラを持っているペンシルバニア大学と共同研究ということで、ブルックヘブンがケミストリーを担当し、NIMHが脳の動きを見て、ペンシルバニア大学がクリニカルメディシンとしてカメラで撮像するという共同研究をいたしまして、1976年に初めてヒトへの投与に成功いたしました。

Aug.16, 1976

- First functional imaging by PET had been succeeded with FDG
- Collaboration with BNL(chemistry), NIMH(neuro-physiology), Penn Univ.(nuclear medicine)

表4

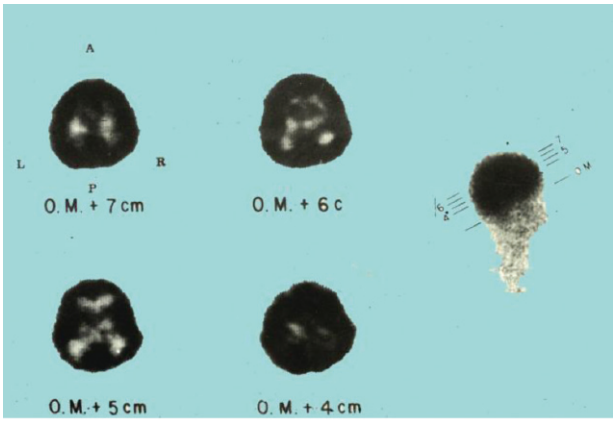
一連の作業の写真です（図11)。サイクロトロンでつくって―ターゲットのところですが、有機合成でFDGをつくり、QCチェックをいたしましてパックして、軽飛行機で運びまして、待っていたボランティアに投与して、こういうカメラで―これはPET用のカメラというよりは、対向型に二対、クリスタルを置いたマークIVと呼ばれるもので、ぐるぐるらせん型に進行するようなカメラですが、それを使って最初の画像を撮りました。

その画像を示しますけれども（図12)、現在のPETの画像からしたら、画質は非常に悪かったのですが、これでも神経細胞のある灰白質と軸索の白質がはっきりと分かれています。さらに、脳室もはっきり認められる。しかも、生きた人の脳でということで、我々

図 11

は非常に興奮したわけです。

さらに画像だけではなくて、先ほどお示ししましたように3コンパートメントモデルでそれぞれの部位について計算いたしますと、それぞれ局所における糖の代謝のスピードを算出することができます（図 13)。そして、算出した数字というのは、そのころほかの方法で動物から測定したり、ヒトの脳でもほかの方法で測定していた



18F-FDG (Mark IV 1976)

図 12

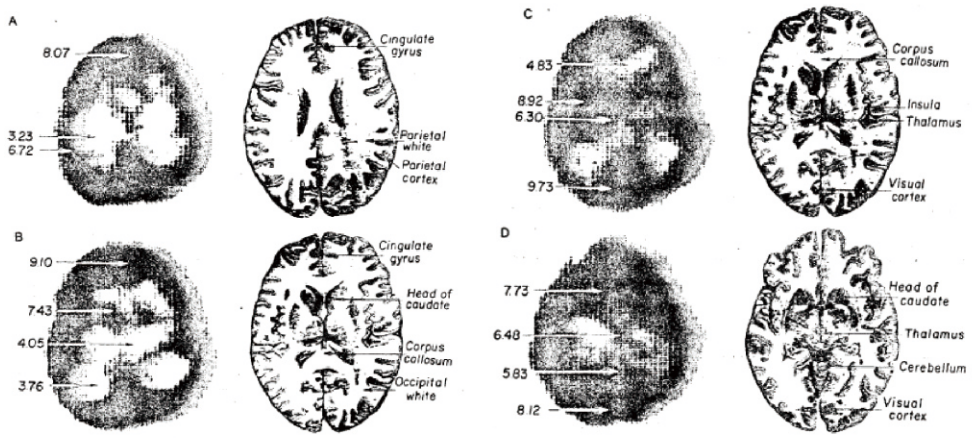


図 13

のと、非常によく一致した値が示されて、この方法がいわゆる 3 コンパートメントモデルで解析できるという形で、脳の中枢の研究に非常に有望だということがわかりました。その後、いろいろな刺激反応で脳がどのように働くのかという研究がずっと続けられてきました。

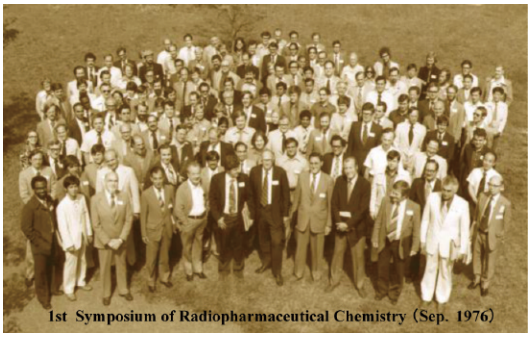


図 14

この研究は、ちょうど 1976 年 9 月に開催した第 1 回の Radio Pharmaceutical Chemistry の会で報告いたしまして、そのときに参加した人たちです（図 14）。これが第 1 回で、現在 2 年ごとにやっていて、最近では 2,000 人近く登録されているのですが、このときには 120 人に満たない人数しか集まりませんでした。

これが世界で初めてつくったときのエピソードですが、日本ではどうだったかといいますと（表 5）、先ほど言いましたように、フッ素 -18 の研究は理研で 1970 年ごろから始めておりましたけれども、放射線医学総合研究所で 1976 年に PET の臨床が始まりまして、1980 年に FDG が日本で初めて使われました（下線）。その後、東北大学、京都大学など

Mile Stone

- Riken:1970-1974
- NIRS: 1974, 1976,1980
- Tohoku Univ.: 1978, 1981,1982
- Nakano Hospital: 1981, 1982
- Akita brain institute: 1982, 1983
- Kyoto Univ.: 1982, 1983, 1983
- Kyushu Univ.,Gunma Univ.,Chiba Univ. : 1983, 1983,1983

表 5

で行われました。このころ、1980 年代は、5 ～ 7 カ所でこの PET の開発研究を進めていたわけでございます。

その後、10 年ぐらいたちますと、先ほどのフッ素で二重結合にフッ素ガスを入れるという反応以外に、フッ素マイナスイオンによる置換反応で FDG ができることがわかりました。それは特にクラウンエーテルやポリイミドエーテルのようなフッ素の化学反応を強める薬剤が使えたからですが、そういう方法が開発されました（図 15）。

もし F_2 ではなくて F^- で反応することができるならば、水を照射してその中に $^{18}F^-$ をつくることができます。その水も ^{18}O で濃縮した水を使えば、ネオンとデュートロンでつくるよりもずっと低いエネルギーのプロトンで、収量もいいということになります。ずっと小型のサイクルトロンでできる。エネルギーが 10MeV ぐらいのプロトンで十分な量のフッ素 -18 をつくることができるということで（図 16）、先ほどの反応と組み

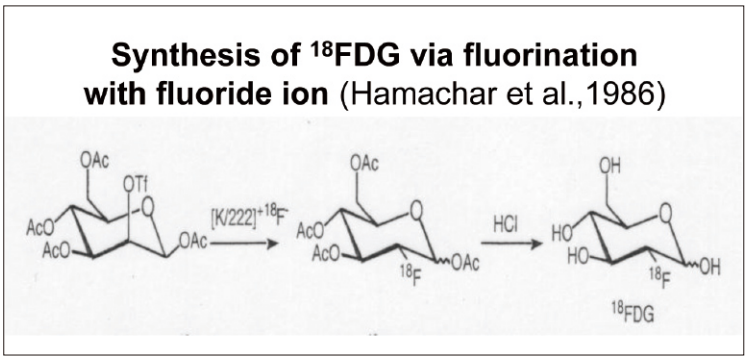


図 15

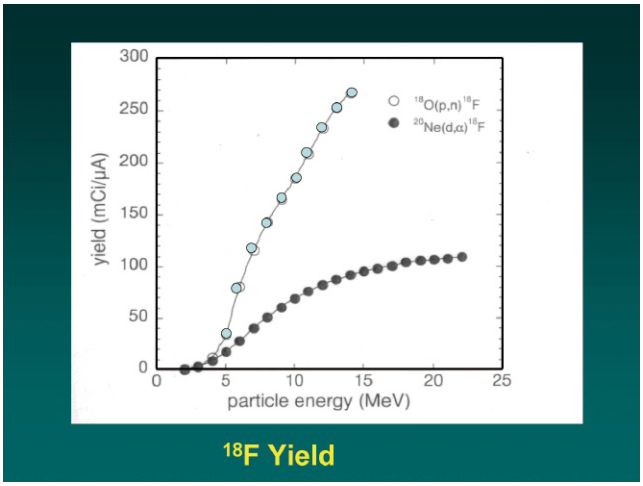


図 16

合わせまして、FDG の合成は専ら ^{18}O の（p, n）^{18}F 反応でつくられております。昔はこの ^{18}O の価格が高くて、なかなか使えなかったのですが、現在ではそれができるようになっております。

また、合成の手法自体が均一化してきましたので、自動合成装置などもいろいろなところで開発されて、それを利用することによって現場で再現性良くに FDG をつくることができるようになりました（図 17）。

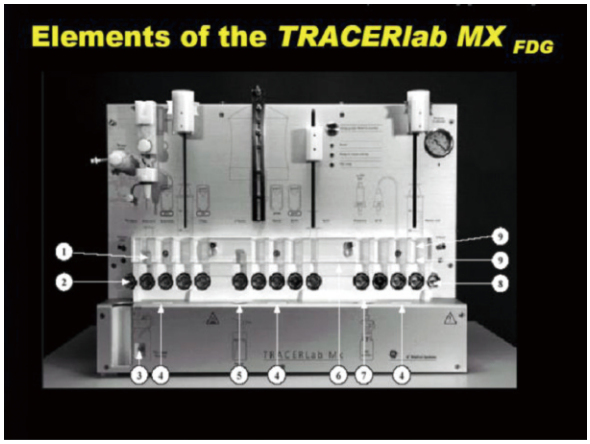


図 17

もともと FDG は脳の研究のために開発した薬ですけれども、グルコースを大量に消費するような組織にはよく集まります。そういう考え方からしますと、がん細胞はエネルギーをよく使っております。O. Warburg のレポートにもありますが、がん細胞自体はグルコースをよく消費するということがわかっております。そこで、がん細胞に対してこの FDG が応用されました。最近では FDG は腫瘍細胞、がん細胞の診断によく使われております。

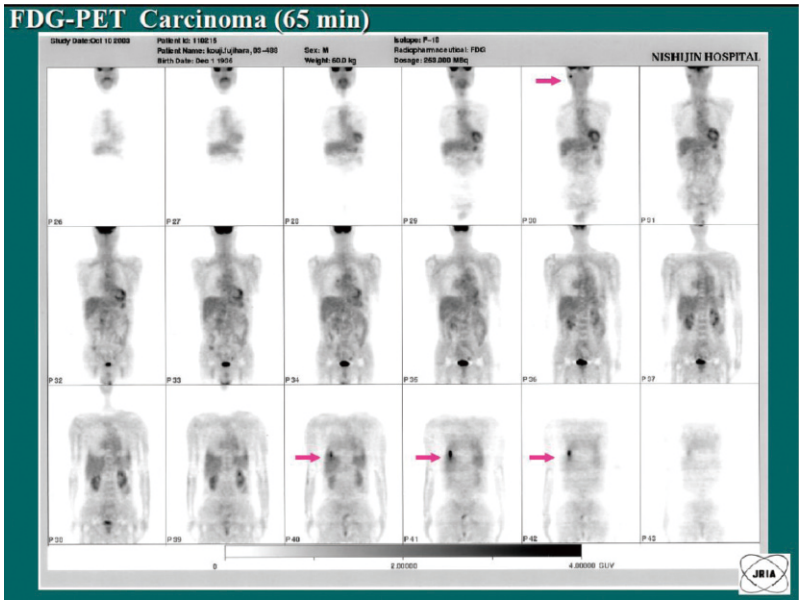


図 18

これは肺がんの検診例（図 18）で、FDG を投与した 65 分後の画ですけれども、矢印で示したところに、はっきりと肺がんがあるのがわかります。

それから、脳腫瘍の場合ですが

（図 19）、脳腫瘍の場合に FDG は余り得策ではありません。というのは、正常脳自体に FDG が入ってしまいますので、ここに（FBPA の赤い部分）ありますように、この部分にグリオーマと言われる脳腫瘍があるわけですけれども、FDG の場合にそれに対応するのがここです。この場合、アミノ酸に（FBPA）―これはフェニルアラニンですけれども、ラベルした場合には、このようにはっきりと正常なところと腫瘍のところがわかります。それは、アミノ酸自体が脳血液関門を通りにくいものですから、正常なところではそれに起因してアップテークが低い。ところが、腫瘍細胞はそれが欠落しているのと同時に、アミノ酸のトランスポーターがふえておりますので、このようにはっきりと出てまいります。FDG でも確かにふえてはいますが、正常なところも FDG を取り込みますので、脳の場合にはアミノ酸のほうが良いということになります。

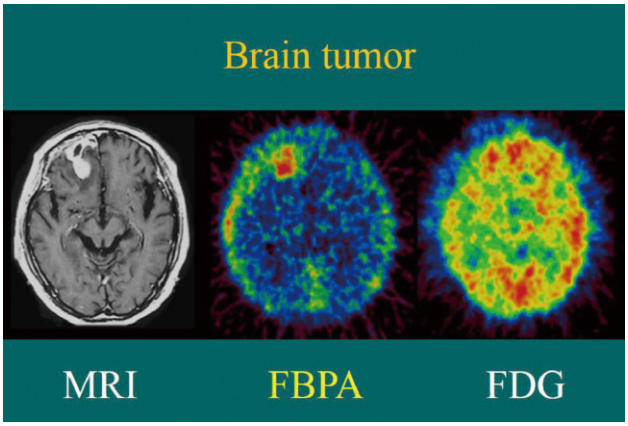


図 19

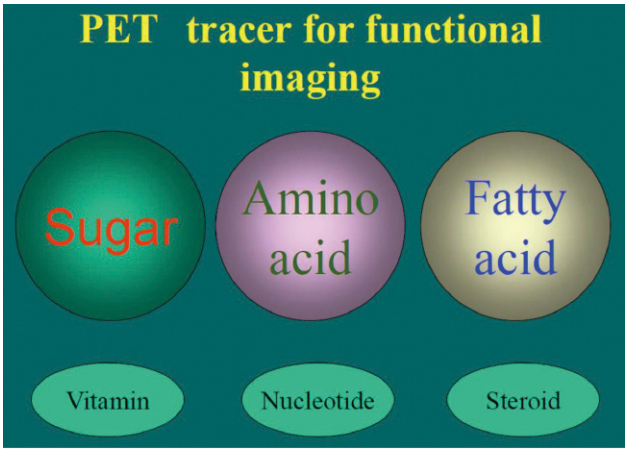


図 20

このように化合物をいろいろとかえることによって（図 20）ファンクショナルイメージング：機能イメージングが行われます。FDG はシュガーですけれども、フェニルアラニンのようなアミノ酸、心筋などが消費します脂肪酸といったものにラベルすることによって、それぞれその機能を見ていくことができます。また、さらには、例えば、ビタミン、核酸、ステロイドといったものにラベルすることによって、生体内で起こっているもっと細かい、詳しいこともわか

ります。

これは（表6）、PETで腫瘍を診断する場合にFDGのほかにどんな化合物が開発されているかを示しています。先ほど言いましたように、たんぱくの合成はメチオニンやフェニルアラニンのようなアミノ酸にラベルしたものが使われます。DNAやRNAの合成は^{11}Cのサイミジンや^{18}Fのフルオロデオキシウリジンというものを使います。このように細胞の膜のアフィニティやレセプター、低酸素疾患、細胞の成長のシグナル、エンザイムのインヒビター、そういったことを目がけていろいろな化合物が開発されています。

今まではファンクション、機能分析ですが、最近はモレキュラーイメージングといいまして、分子・分子の相関を画像により診断していこうということが行われるようになりました（表7）。化合物もそれに適した化合物が開発されております。対象としましては、神経のレセプター、ホルモンレセプター、抗原・抗体反応による細胞表面、センス／アンチセンスの反応を形成するような化合物に^{11}Cや^{18}Fをラベルしております。

今までお話ししたのは特に病態の診断とい

PET-Radiopharmaceuticals for Tumor Detection

- Energy Metabolic Substrate　^{18}FDG,
- Protein Synthesis　^{11}C-Methionine, ^{18}FPA
- DNA, RNA Synthesis　^{11}C-Thymidine, ^{18}FdUR
- Membrane Affinity　Monoclonal antibody
- Receptor ligand　^{18}F-Steroids, ^{11}C-Tamoxiphen
- Hypoxia　^{18}F-MISO, analog
- Cell Growth Signal　^{18}FDAG
- Enzyme Inhibitor　^{18}FHPG
- Molecular Imaging agent

表6

PET tracer for molecular Imaging

Tracer technique for molecular-molecular coupling in biomedical field

Object
- Neuro Receptor
- Hormone Receptor
- Antigen on the cell surface
- Sense-antisense reaction

表7

創薬を目指したPET診断薬

人体での第0相試験

- 薬の体内動態を評価する
- 対象薬剤のマイクロドーズ検査
  11C-標識
- 薬の効果を評価する
  各種PET薬剤

表8

ったことですが、医薬品をつくるという場においても PET 診断薬が活躍できます（表 8）。まだ第Ⅰ相、第Ⅱ相まで行かない段階で、開発した薬剤が体の中でどのように分布するか、すなわち、PET を使えば薬の体内状態を評価することができます。対象薬剤のマイクロドーズ検査に応用することができます。特にその場合には ^{11}C で標識した化合物ということです。さらに、デザインした化合物の薬効を調べていくわけですが、効くという臓器に集まっているか、行っていないかというのは、血中濃度をはかっただけではどうしようもないわけで、実際にそこに行っているということを PET で確認することができます。そういう利用の仕方をすれば、創薬にかかる時間が、10 年、20 年かかっているわけですけれども、それを大幅に短縮することができますし、動物実験の数も少なくすることができるわけです。

1990 年代に PET が保険に採用されたということもありまして、現在 2010 年 6 月の時点で、271 カ所で PET 診断を行っております（図 21）。そのうち約半数の 137 の施設が施設内にサイクロトロンを持って、自分のところで標識化合物をつくって投与する。その他のところは製薬会社からフルオロデオキシグルコースの供給を受けて診断をするという

図 21

ことが行われております。

次に、画像診断には、もう１つのと申しますか、もともとこちらのほうが一般的ですけれども、テクネチウム^{99m}Tcが—これは先ほどの核分裂生成物で出てきたモリブデン^{99}Moの娘の核種ですが、放射性医薬品として広く使われております。この化合物はキレート化していろいろな形に変えることができるので、その応用範囲が広く、ここに示しましたように（表9）脳の血液量、心筋血液量、神経伝達機能、骨のスキャン、腫瘍診断、肝機能、腎機能を診断するために、それぞれここに挙げたようないろいろな化合物が開発されて使われております。

^{99m}Tc診断薬

- 脳血流量：^{99m}Tc-HM-PAO,^{99}mTc-ECD
- 心筋血流量：^{99m}Tc-MIBI, ^{99m}Tc-tetrofosmin
- 神経伝達機能：^{99m}Tc-TRODAT
- 骨スキャン：^{99m}Tc-MDP
- 腫瘍診断：^{99m}Tc-octeotide, ^{99m}Tc-DMS
- 肝機能：^{99m}Tc-DTPA-GSA, ^{99m}Tc-PHMT
- 腎機能：^{99m}Tc-MAG3, ^{99m}Tc-EC

表9

幾つかの例を示しますと、これは（図22）骨のスキャンに使われますテクネチウムMDPによる画像ですが、このように骨を描出することができます。骨への腫瘍の転移をはっきりと診断することができます。前立腺がんや乳がんは骨への転移が起こってくるのですけれども、先ほどのテクネチウムで診らべますと、骨への転移がはっきりと見えます。

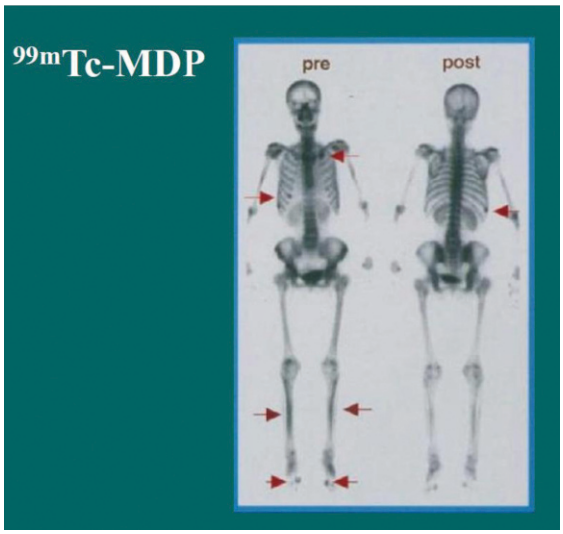


図22

（図23）の右はフッ化ナトリウム（Na^{18}F）の場合で、フッ素も骨によく集まりますので、このような画像が撮れます。同じ患者さんの場合ですが、見てみますと、

感度はテムネシウム（左）よりフッ素のほうが少し良い。ただ、転移したものは双方とも確認できます。

それから（図 24）、腫瘍ではないのですけれども、疲労骨折の場合、完全にぽっきといったわけではなくて、ひびがいったぐらいでしょうが、エックス線で見ても余りはっきりと出てきませんけれども、先ほどの骨スキャンでは、きちっとこの部分に疲労骨折が起こっているということがわかります。こういった診断も行われています。

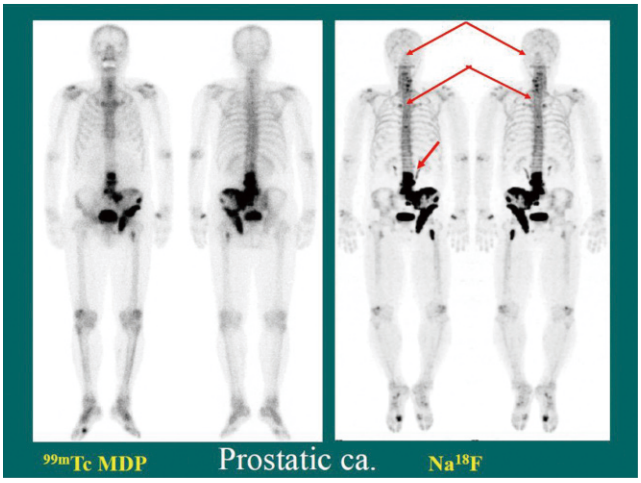


図 23

さて、^{99m}Tc ですが、先ほど言いましたように、原子炉で核分裂生成物からつくるわけですが、原子炉のコアの周りにある中性子の照射孔でウランを照射して、そこで核分裂を起こさせて、生成物中から ^{99}Mo を精製してまいります。

核分裂核種の生成量に 2 つの山があります（図 25）。左の山のほう、ここに ^{99}Mo、^{90}Sr などがあります。右の山が ^{137}Cs や ^{131}I になるわけです。いずれも医学応用されております。

図 24

テクネチウム-99m の場合、まずモリブデン-99 という形で分離いたしまして、これの娘核種であるテクネチウム-99m をモリブデン-99 から分けて使います。モリブデン-99 の半

減期が 66 時間ぐらいですし、テクネチウムは 6 時間ぐらいですから、ちょうどジェネレーターとして利用するのに都合のいい半減期を持っています。

ここに（図 26）モリブデン-99 を、中央のアルミナのカラムですが、吸着させまして、左側から生理食塩水を流してやりますと、^{99}Mo は吸着したままで、壊変してできる ^{99m}Tc はパーテクネテート（$^{99m}TcO_4^-$）の形で右側に溶出してまいります。これをいろいろな試薬でラベルして、先ほど示しましたような放射性医薬品として使っていくことになります。

これがいわゆるテクネチウムのジェネレーターと言われているものの構造です。

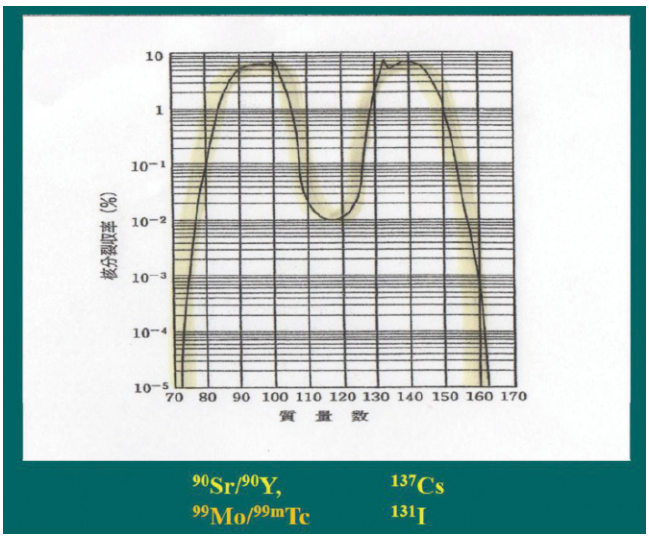


図 25

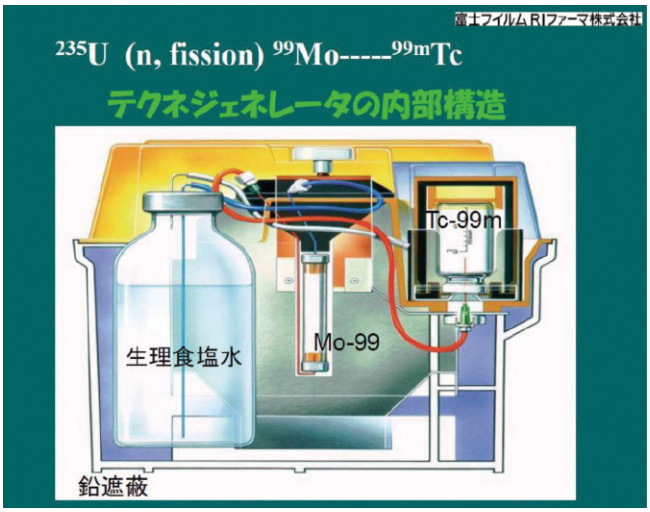


図 26

モリブデンの供給径路図でいいますと（図 27）、まずターゲットとしての ^{235}U ですが、これを原子炉で照射して、核分裂生成物からモリブデンを水酸化ナトリウム溶液で溶かして、その後、イオン交換などを使ってモリブデンを精製してまいります。日本ではその溶液を輸入いたしまして、製薬メーカーで先ほどのジェネレーターをつくるか、そのジェネレーターからできたテクネチウム-99 で注射液をつくりまして、病院に供給するというプロセスをとっております。

照射には大体５～６日間かかりますし、精製するのに数日かかりますので、８～10日かかっております。この輸送の問題で、現在、日本はカナダやヨーロッパから輸入しておりますので、そこで２日ほど時間を経過してしまいます。最終的に病院で利用するまでに２半減期ぐらい経過するということでございます。

図 27

日本の場合には（図 28）、先ほど言いましたように、原料とするモリブデン-99 は 100%輸入に頼っておりまして、国内ではモリブデン-99 を製造しておりません。特に輸入するのはヨーロッパの３原子炉、南アフリカの１原子炉、カナダの１原子炉で、そこからモリブデン -99 を輸入しておりますが、2009 年５月にカナダの炉がとまってしまいました。原子炉内でリークを起こして、その修理のためにとめたわけですけれども、その間、約１年以上かかりました。

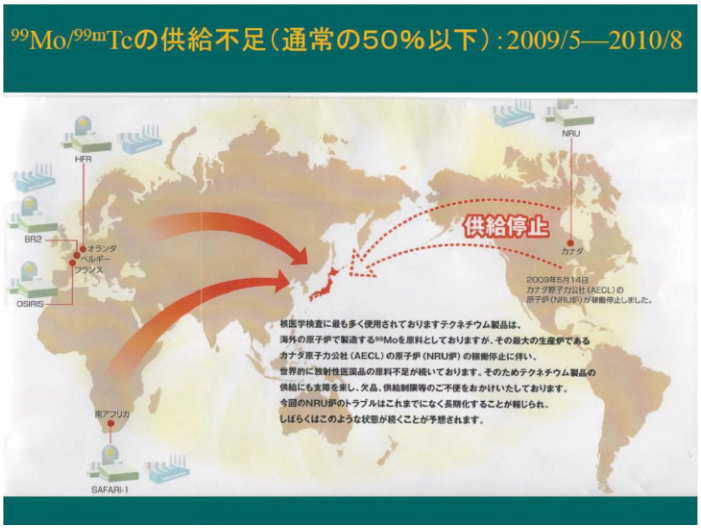


図 28

カナダの炉は全世界の必要量の大体 30%ぐらいを供給していたわけですけれども、日本はカナダから国内必要量の 50%～70%ぐらいを輸入していました。これがとまってしまったので、急遽、南アフリカやオランダからの輸入量をふやしました。それでも日本に入ってきた量は通常の 50%以下の原料しか入ってきませんでした。しかし、その場合に

製薬会社、関係学会、病院などの協力を得て、先ほどのジェネレーターの形では供給せずに、テクネチウム製剤の形で供給するという形をとって、90%ぐらいの需要にこたえたわけでございます。幸いなことに、2010 年 8 月にもとへ戻りまして、現在ではそういう供給の不安定性はなくなっております。

しかし、100%輸入しているという状況は、日本の医療体制にとって脆弱であるという問題が、原子力委員会、学術会議、核医学会などから起こりまして（図 29）、特に内閣府を中心として官民が一緒になって日本での製造再開を考えようという形になりました。日本の場合にまず考えられるのは、フィッション製剤というわけではなくて、モリブデン ^{100}Mo に中性子吸収させて（n, γ）反応でモリブデン ^{99}Mo をつくることを考えています。そのために大洗の材料試験炉である JMTR が手を挙げてくれまして、そこで照射する。それを精製して ^{99}Mo をつくっていく。

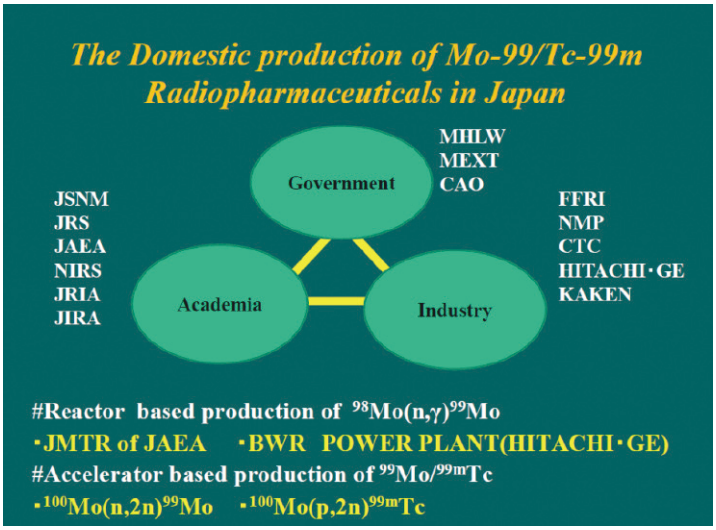


図 29

もう 1 つのアイデアとしては、発電炉の BWR は照射孔として使える貫通孔がありますので、それを使うという案があったのですが、福島の事故が起こりました後では、BWR を使うというアイデアはどこかに消えてしまったということでございます。

さらに、加速器を使ってモリブデン、テクネチウムをつくっていこうという考え方があります。(n, 2n) 反応、(p, 2n) 反応でダイレクトに ^{99m}Tc をつくるということも検討しておりますが、加速器でつくるのは生成量からしてメインとはならないのではないかとは考えております。

（n, γ）でつくる場合に問題となるのは、モリブデンでの比放射能が非常に低いということです。とれるテクネチウムの比放射能といいますか、濃度が非常に薄いということで

す。ラベルするためには1mℓ当たり1Ci以上の放射能を持った^{99m}Tcが必要ですけれども、そのためにはいろいろな濃縮方法が検討されなければならない。現在これを検討しております（表10）。

実際のハイレベルでの実験をした上で、どの方法をとっていくかという決定をしたいのですけれども、いまJRR-3も停まっておりまして、JMTRもまだ停まっております。この辺が少し遅れておりますが、こういう実験をした後、一番良い方法を採用して、日本では（n, γ）での実用レベルのものを成功させたいと考えております。

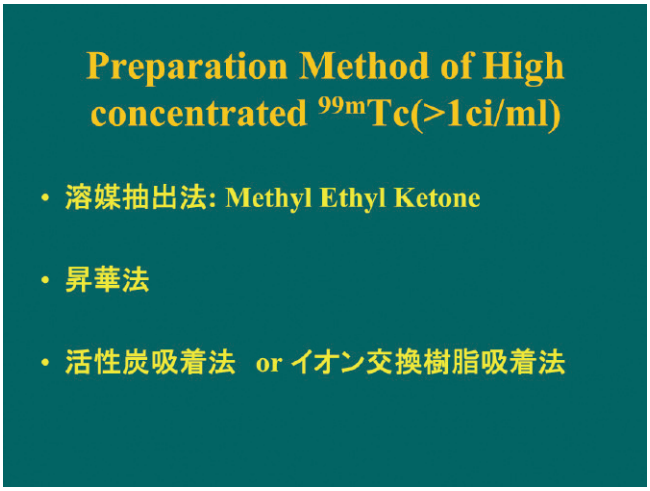


表10

さらに、フィッションのものをヨーロッパから運んだり、北米から運んだりしておりますけれども、アジア・オセアニア圏、近いところから運べば、輸送の際のロスが少なくなるというので、アジアの5カ国を中心としまして安定供給のネットワークを組むことに成功いたしました（図30）。2010年10月にそのネットワークが設立されました。現在モリブデンをつくれるのは、オーストラリアのOPAL炉とインドネシアのGAS炉で、そこが^{99}Moの供給を担

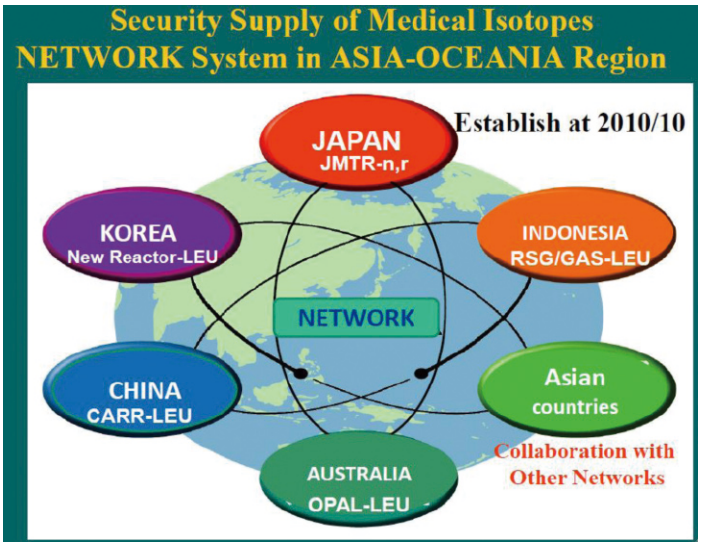


図30

っております。中国、韓国、日本は将来の計画を進めております。

現在、オーストラリアの OPAL では、1 週間に 1,000Ci の ^{99}Mo をつくっております（表 11）。表中で LEU と記されているのは、ターゲットに 20%以下の ^{235}U 濃縮度のものを使う。これは核拡散防止の観点から、ターゲットそれ自体を low enrich のウラニウムを使うようにと推奨されているためです。インドネシアは、この 3 月ですが、900Ci/week に達することに成功しました。したがって、アジア・オセアニア圏では大体 2,000Ci/week の製造量が得られるわけですが、もちろんアジア・オセアニアからほかの域圏、例えば、ヨーロッパやアメリカにも供給しますので、それ全部がアジア・オセアニアで消費されるわけではありませんけれども、現時点においてアジア・オセアニアでの要求量と大体それに見合った量でございます。

Ability of ^{99}Mo production in Asia Oceania Region

- **Australia: Opal reactor LEU 1000Ci/w**
- **Indonesia: MPR-30 LEU ~900Ci/w**
- **China: CARR LEU 1000Ci/w 2015**
- **Japan: JMTR Mo (n,r) 230Ci/w 2014**
- **Korea: New Reactor 1000Ci/w 2017**

表 11

将来的に中国では北京の郊外にある CARR 炉で 1,000Ci/week、日本では先ほど言いました JMTR の炉を使いまして 230Ci/week を（n, γ）でつくる。それから、韓国は新しいリアクターを釜山につくりますが、そこでは 2017 年に約 1,000Ci/week を目指してつくる。そうしますと、2017 年あたりには製造量が結構出てまいります。

次に危ないのが 2016 年です。なぜかといいますと、カナダの炉は 2016 年までしか動かない。そこで製造をストップします。ただ、その 2016 年は何とか他の原子炉の計画がこのような形で予定どおりに進行すればしのげると考えております。

このような状態が現状で、テクネチウム -99m でもいろいろな問題点がありましたけれども、現在そんなに悲観することはなく、何とか安定に供給もされ、医薬利用が進んでいくと考えております。

どうも有難うございました。

司会　それほど悲観することはなさそうということでございます。今までモリブデン-99は危機だと叫ばれていたのでちょっと心配していました。

司会　それでは、最後のご講演になりますけれども、スーパーコンピュータ「京」が間もなく運用されますが、これが拓く未来ということで、理研仁科センターの主任研究員であり、東京大学大学院理学系研究科の教授でいらっしゃいます初田さんからお話を伺います。初田さんは理論物理学者であります。

「素粒子・原子核から宇宙へ：スーパーコンピュータと現代物理学」

初田哲男（理化学研究所・仁科加速器研究センター・主任研究員）

これから 45 分間、理論物理学という観点から、仁科芳雄博士が始められたこと、それが現在にどうつながっているか、について、スーパーコンピュータとのつながりにも触れながらお話ししたいと思います。

1890	岡山県生まれ
1921-1928	ヨーロッパ・アメリカ留学
1928	クライン-仁科の公式
1931	京都大学で量子力学の集中講義（湯川、朝永、坂田、小林ら聴講）
1931	理研　仁科研究室創設
1937	小サイクロトロン完成
1943	大サイクロトロン完成
1946	理研第4代所長
1948	科学研究所社長
1951	逝去

表 1

お手元の年表（表 1）にもあると思うのですが、仁科さんは理論も実験も両方行うことができた最後の世代の一人ではないかと思います。1921 年から 1928 年の間にヨーロッパに留学されて、1928 年には光と物質の相互作用に関するクライン＝仁科の公式をコペンハーゲン滞在中に導出されました。論文自身は 1929 年に発表されていますが、この公式は、直前に発表されたディラックの相対論的量子力学を用いて、非常に大変な計算の結果導かれたもので、現在でも有用です。（もっとも、今では計算方法の進展により、大学4年生や大学院1年生の演習問題にでてくるような計算になっています）その後、日本に帰国されて、1931 年には、当時でき上がったばかりの量子力学に関する集中講義を京都大学で行い、そこに京都大学におられた湯川秀樹さん、朝永振一郎さん、坂田昌一さん、らが聴講されていました。ここから日本の原子核や素粒子の本格的な理論研究がスタートしたということになります。

1931 年に理研に仁科研究室が発足し、基礎物理学に関係する様々な理論研究と実験研究が始まりました。ここに（図 1）お見せしているのは、仁科さんが昭和 24 年 11 月に書かれた色紙で「環境は人をつくり、人は環境をつくる」とあります。これには、いろいろな意味が込められているのだと想像されます。コペンハーゲンにおられたときは、量子力

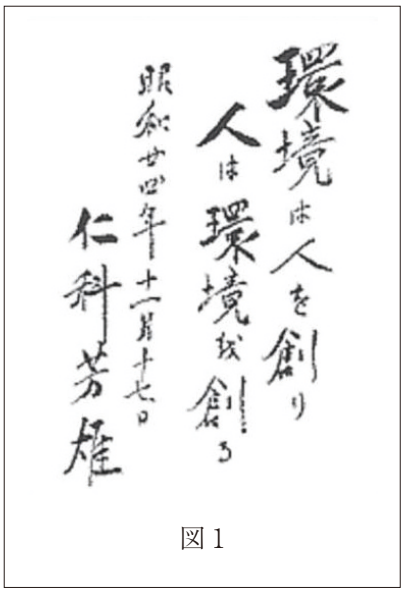


図 1

学の構築に大きく貢献したボーアという先生がおられましたが、この方が研究者にとって非常に自由な環境をつくり、その中で様々な分野の研究者が育っていったということを念頭に置かれているのかもしれませんし、日本で仁科研究室を立ち上げて以来、様々な研究者を育てられた経験を念頭に置かれているのかもしれません。

後者の例として、昭和 18 年（1943 年）の仁科研究室の理論関係者（図 2）をお見せしましょう。これは理化学研究所案内（仁科記念財団冊子 NKZ-48 に採録）という冊子です。理論関係のところだけを抜き出してみると「宇宙線、原子核並びに中間子の理論」、「固体の量子論」などの研究テーマが担当研究者の氏名とともに挙げられていますが、実に錚々たる顔ぶれです。仁科さんが主任研究員、研究員として朝永振一郎さん、湯川秀樹さん、嘱託として坂田昌一さんなどの名前があります。湯川さんは 1947 年に、朝永さんは 1965 年にノーベル物理学賞を受けられています。坂田さんもノーベル賞を受賞して当然の方ですが、残念ながら早く亡くなられてしまいました。南部陽一郎さんは、さまざまの文章で、朝永さんの影響を強く受けられたことを書いておられます。小林誠さんと益川敏英さんは、坂田さんのお弟子さんということですので、2008 年

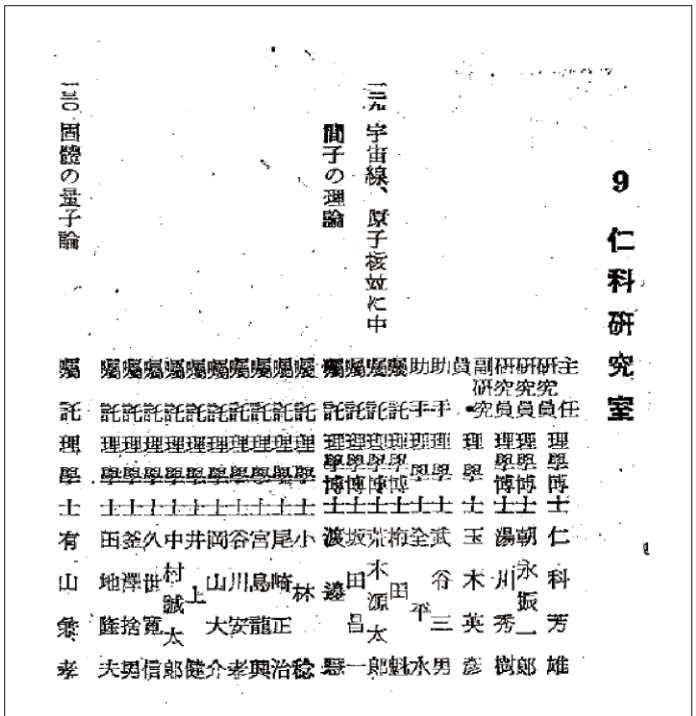


図 2

にノーベル賞を受賞されたお3方はいずれも仁科さんに繋がっていると言えるかもしれません。

ここまで、仁科さんが日本の理論物理学者に直接的・間接的に与えた影響を中心にお話しました。ここからは、現代物理学の課題（図3）について少々触れてみたいと思います。

図3

現代物理学の基本課題は大きくわけて2つあるのではないかと思います。1つは、物質は何からどのようにできているのか、という問題です。これは古代からある問いですが、現代物理学という観点では、20世紀の前半から理解が大きく進展をはじめました。もう1つの問題は、宇宙はいかに始まり、どのように現在の姿になったのか、というものです。20世紀の後半には、観測結果に照らしてこの問いについて真剣に考えることが可能になってきました。21世紀にはいると、これら2つの問いを渾然一体のものとして論じるのが、いわば常識的なことであると認識されるに至りました。

これらの問いに答えるための現代物理学の研究手段は主に3つあります。その1つは理論物理学で、“紙と鉛筆”を使った研究ということができます。2つ目は実験物理学で、加速器や様々な検出器、人工衛星などを駆使した実証的研究です。近年は、第3の研究手段として、スーパーコンピュータを用いた計算物理学も台頭してきました。ただし、紙と鉛筆を机に置いておけば勝手に理論が出来上がるはずがないのと同様、スーパーコンピュータも人間によるプログラムがなければ勝手に計算をするはずはありません。結局、最も重要なのは、これらの背後にある人間の頭脳なのです。

原子核・素粒子・宇宙などの基礎物理学の研究では、研究成果の社会への応用を最初から目指すことはほとんどありませんが、結果として応用が生まれることがあります。ただし、どのような応用が生まれるのかを予測することは極めて困難です。例として、カーナ

ビで使われているGPSを取り上げてみましょう。GPSが誤差なく作動するためには、100年前に提唱されたアインシュタインの特殊相対性理論や一般相対性理論が必要です。GPSに使われる衛星は、大きな速度で地球を周回していますから、衛星に設置された時計の進み方は、地上より遅くなります。この時間の遅れは、特殊相対性理論に基づいて補正しなければなりません。また、衛星は地上の我々より高い位置にありますから、衛星が地球から感じる重力が小さく、衛星の時計の進み方は地上より早くなります。これは、一般相対論的な効果として補正に取り入れなければなりません。これら複数の効果をきちんと考慮して、初めて自動車の精密な位置がカーナビで特定できるのです。100年後にカーナビに応用されることなど、アインシュタインは想像すらしなかったことでしょう。一方で、技術の進歩が、基礎物理学の研究に大きな飛躍をもたらすことは多々あり、この意味で基礎科学と応用技術は、互いに支え合って進歩してきたし、これからもそのような関係は続いていくであろうと考えられます。

さて、物理学における真理の探求ということに関して、現在どのような研究が行われているか、さらにスーパーコンピュータがそれにどのように貢献しているかについて、もう少しお話ししたいと思います。

ここでお見せする図（図4）は、ミクロの研究とマクロの研究は実はつながっているということをウロボロスという完全性をあらわす象徴を用いて端的にあらわしたものです。宇宙や銀河などのマクロな世界から徐々にズームアップしていくと、太陽系、地球、人間があり、さらに細かく見ると分子・原子・原子核、そして素粒子の世界に至ります。ところが、素粒子の研究をとことん突き詰めていくと、実は宇宙の始まりの問題と関係しているということがわかってきます。この意味で、マクロなスケールの宇宙の問題と、

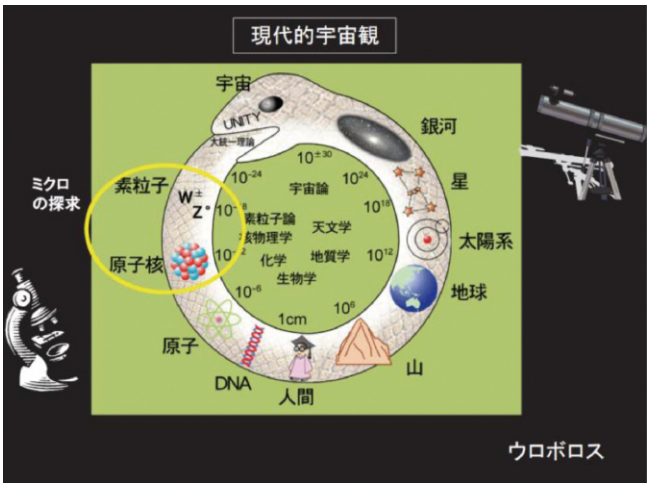


図4

原子核や素粒子のミクロなスケールの問題は、深いところでつながっているのです。

さて、最初にミクロの探求という観点から、原子核や素粒子が現在どこまで解明されているかについて概略をお話しします（図 5）。物質の根源は何かという問いは古くからからありましたが、古代には、水・火・風・土が根源だというような観念的な理解だったわけです。しかし、19 世紀に入って、ドルトンにより原子の実在が示唆され、20 世紀初頭には原子は電子と原子核からなることが明らかになりました。原子の大きさは 1000 万分の 1 cm 程度ですが、原子核の大きさは 1 兆分の 1 cm（これは 10^{-12}cm に対応します）とまさにミクロの世界です。原子核は原子の中心にあり、物質が持つ質量の 99％は原子核が担っています。さらに、原子核は陽子と中性子が集まったもので、その陽子や中性子はクォークと呼ばれる素粒子でできていることが 20 世紀後半に明らかになりました。陽子や中性子の大きさは、10 兆分の 1 cm 程度、クォークの大きさは今のところ測定不能なほど小さいと考えられています。21 世紀後半か 22 世紀には、ひょっとすると、クォークの大きさやクォークの内部構造が明らかになるのかもしれません。

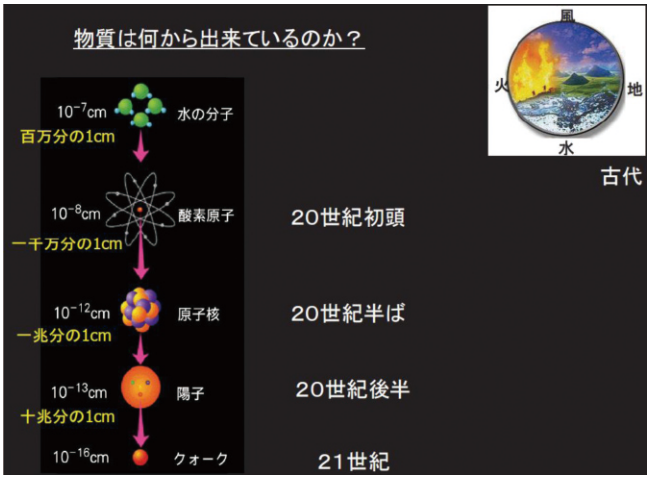


図 5

さて、単にクォークが存在するというだけだと、それらがどのように集まって陽子や中性子や原子核をつくるのかということはわかりません。クォークの間になんらかの引き寄せ合う力（物理学では“相互作用”と呼ばれます）が働いているはずです。クォークに限らず、物質を構成する素粒子に働く力は、必ず力を媒介する粒子を伴っているというのが現代物理学の考え方です。この概念を陽子と中性子に間に働く強い力（核力と呼ばれます）という具体例を通して最初に提唱したのが湯川さんで、1935 年のことです。

湯川さんが所長を務められた京都大学の基礎物理学研究所へ行きますと、湯川記念室というのがあって、核力の理論（中間子論）に関する湯川論文の原稿を見ることができ、そ

こに核力を媒介する湯川中間子が従う方程式が自筆で書かれています。さらに、素粒子の間に働く力を数学的に定式化したらどうなるかということを、光と物質の相互作用の理論（量子電気力学と呼ばれます）を例にとって突き詰めたのが朝永さんです。朝永さんが学長を務められた東京教育大学の後身である筑波大学に朝永記念室というのがあります。そこで、朝永方程式と呼ばれる量子電気力学の基礎方程式が自筆で書かれた色紙を見ることができます（図 7）。核力を媒介する中間子、電磁気力を媒介する光子と同様に、クォークの間に力を伝えて陽子や中性子を形つくる媒介粒子が存在します。この糊の役割を果たす粒子はグルーオンと呼ばれ 8 種類存在します。また、クォークとグルーオンの相互作用を司る力学は、量子色力学と呼ばれています。以上述べたように、素粒子には物質を構成する粒子と、その間に働く力を媒介する粒子、がありますが、それ以外に、クォークや電子などに質量を与える役割を果たすヒッグス粒子が存在すると考えられています（図 8）。*

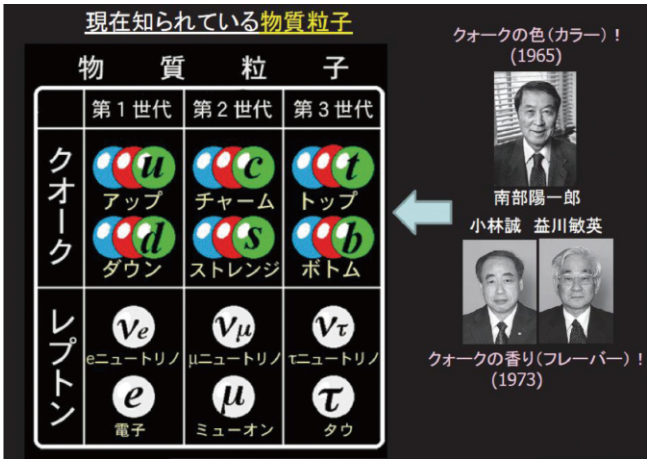


図 6

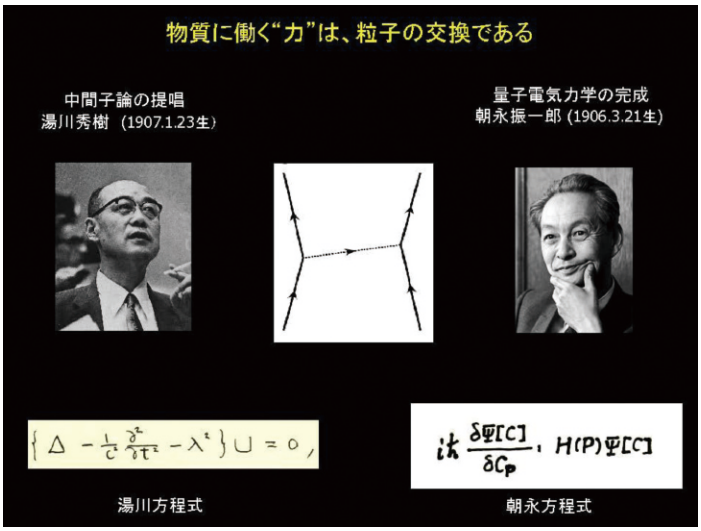


図 7

さて、陽子や中性子の構造、およびその間に働く核力について、

現代的観点から詳しく見てみましょう。まず、陽子や中性子（以下では総称して核子と呼ぶことにします）は、クォークが３つ結合して出来ています。グルーオンからできたゼリーのような塊の中にクォークが３つ閉じ込められているというのが当たらずとも遠からずのイメージです。このグルーオンとクォークからなる大きさ 10^{-13}cm の塊としての核子が、さらに複数集まって、大きさ 10^{-12}cm 程度の原子核ができるわけです（図 9）。

図 8

いったいクォークは見ることができるのでしょうか？　それに答える前に、“見える”とはどういうことかを、ここに示したテニスボールを例に考えてみましょう。テニスボールの色や形は、外部から光が当たり、その反射光が目に入ることで観察できます。言い換えれば、真っ暗な状況ではテニスボールは見えません。核子の内部にあるクォークについても考え方は同じです。実際には、核子に高エネルギーの電子線を当て、電子がはね返ってくる様子を観測することで核子の中にあるクォークの運動を調べることができます。ここにお見せするのは、既に運転を停止した HERA という周長約 6km の加速器ですが、まさに電子と陽子を衝突させて、陽子の中のクォークを観測するという実験が行われていま

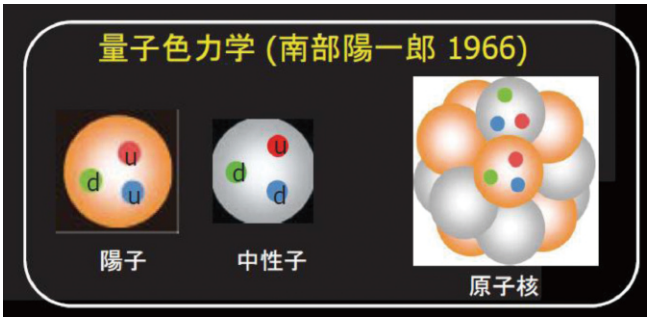


図 9

した。

核子はクォークから出来ていることが明らかになった現在、核子の間に働く核力も、クォークとグルーオンの力学、つまり量子色力学、から考える必要が出てきます。クォークの発見以前に提唱された湯川さんによる核力の中間子論が、いったいどこまで正しいのかという疑問も、そのような研究を通じて明らかにできるはずです。ところが、これは一筋縄の仕事ではないのです。南部陽一郎さんの『クォーク』という一般向けの素粒子物理学入門書があり、第 2 版が 1997 年に出版されています。その中で、「現在でも核力の詳細を基本方程式から導くことはできない。核子自体がもう素粒子とは見なされないから、いわば複雑な高分子の性質をシュレーディンガー方程式から出発して決定せよというようなもので、むしろこれは無理な話である。」と述べられています（図 10）。

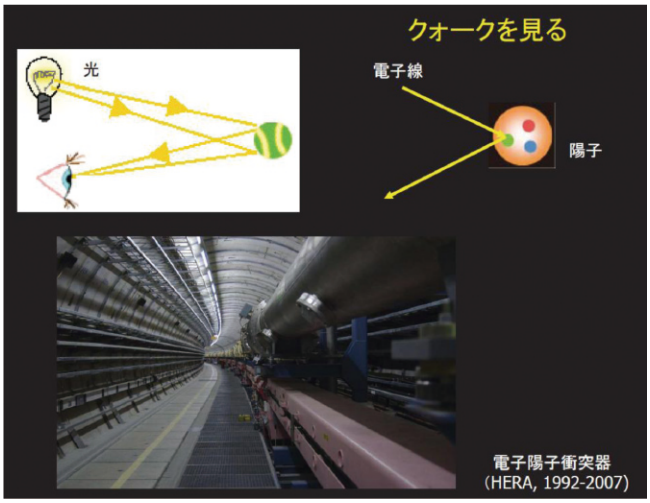


図 9

ところが、この壁を乗り越える方法が現れました。いわゆるスーパーコンピュータです。ここに示す図は（図 11）、コンピュータの演算速度の上昇を示しています。　横軸は西暦年、縦軸は演算性能をあらわす FLOPS（フロップス）という指標

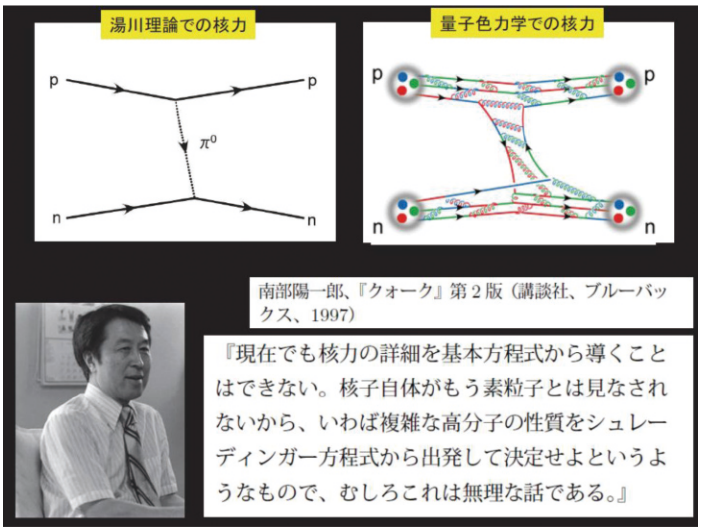


図 10

です。GFLOPS（ギガフロップス）、TFLOPS（テラフロップス）、PFLOPS（ペタフロップス）は、それぞれ 1 秒間に 10 億回、1 兆回、1000 兆回の演算（加減乗除）が可能です。これを見てわかるように、1980 年ごろは 0.1GFLOPS だった性能が、1997 年あたりに 1TFLOPS，現在は 10PFLOPS の時代に突入しています。日本の計算機は、要所々々で世界をリードする演算性能を達成してきました。航空宇宙技術研究所の「数値風洞」、筑波大学の「CP-PACS」、海洋開発研究機構の「地球シミュレータ」、そして理化学研究所・計算科学研究機構で昨年 9 月より稼動を始めた「京コンピュータ」などです。南部さんが、「無理な話である」と書かれた 1997 年当時から、大幅に演算性能が上がったことで、無理と思われたことが可能になってきたのです。

例を 1 つお見せします（図 12）。50TFLOPS 級の計算機を用いて、核力の計算ができそうだと判明した 2007 年ごろの計算例です。湯川さんが提唱したように、陽子や中性子の間には引力が働き、それらが数個から数百個集まってできたのが原子核です。しかし、引力ばかりだったら、原子核は一点につぶれてしまうのではないか、というもっともな疑問

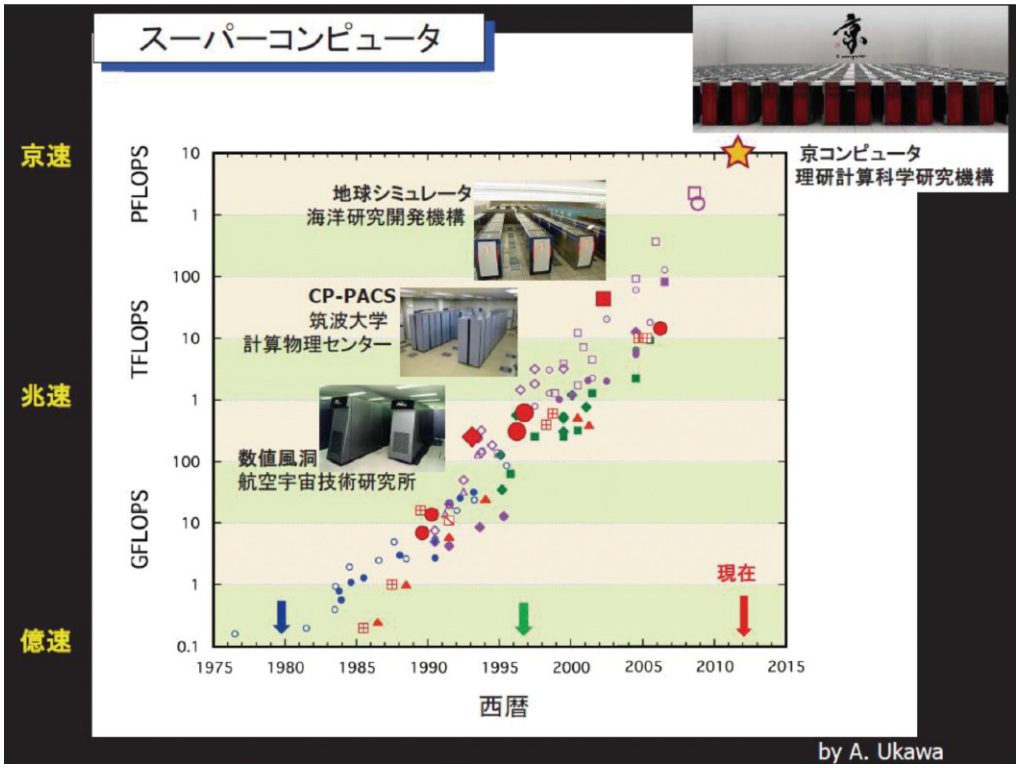


図 11

がうまれます。これに答えるべく、青木慎也さん、石井理修さんと私は、陽子と中性子の間に働く力を、相対距離の関数として計算する理論的方法を考案しました。この理論はそれ自身でたいそう面白い内容を持っているのですが、実際に計算を実行しようとすると膨大な計算時間が必要になります。幸いなことに、2006年に高エネルギー加速器研究機構にBlueGene/Lという当時国内最速のIBM社製スーパーコンピュータが導入されました。しかも、フル稼働を始める前のテスト期間の数か月間、この計算機を優先的に利用させてもらうことができました。およそ4カ月（3000時間）の計算時間を使った結果、核力の正体がおぼろげながらわかってきました。

図 12

ここにお見せする図は（図13）、我々が2007年にフィジカル・レビュー・レターズという専門誌に発表した世界初の核力計算の結果です、横軸は陽子と中性子の相対距離、縦軸にはポテンシャルエネルギーを表しています。ポテンシャルエネルギーというのは、山の等高線のようなもので、その傾斜具合で力の働く方向と大きさがわかります。湯川さんが中間子論で予言した陽子と中性子の間のポテンシャルエネルギーは、近距離に向かって落ち込んでいるので、原子核はまさにつぶれてしまいます。ところが、我々の計算結果は、陽子と中性子が近づきすぎると、逆に反発力が働き、原子核がつぶれるのを押しとどめることを示しています。図のポテンシャルエネルギーが、短距離で急激に立ち上がっている、つまり険しい山が切り立っている、のがこれに対応します。原子核は、湯川さんの予言した核子間に働く遠距離での引力に加えて、近距離での反発力（斥力）があって、そのバランスの結果として安定に存在しているわけです。生命や星を構成する物質の主成分としての“原子核の安定性”が、量子色力学というミクロな理論で明らかにできたことになります。

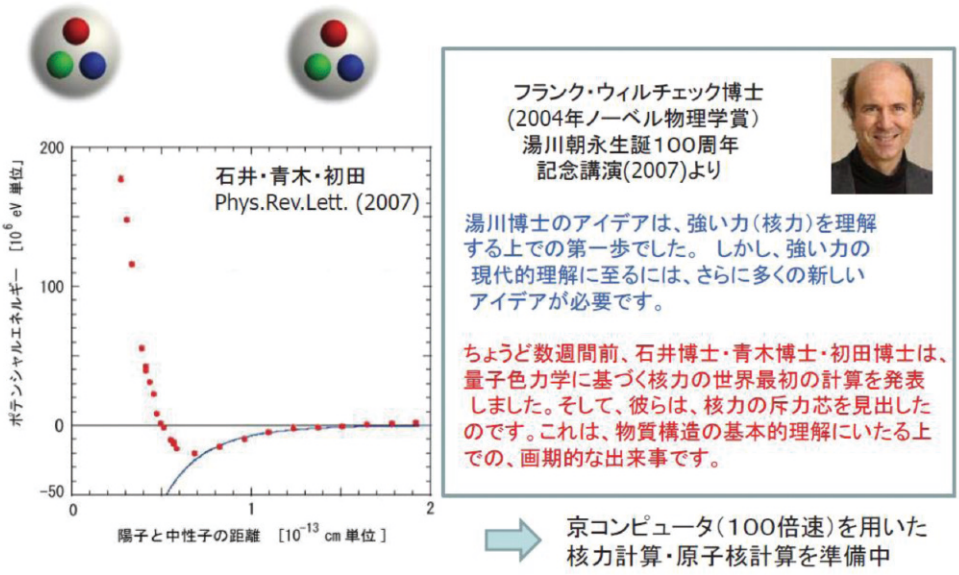


図 13

この結果は、単に難しい計算がスーパーコンピュータを用いて可能になったという以上に、物質存在の根源に関わる問題に解答を与えるきっかけを与えたという意味で大きな意義があり、計算結果には非常に興奮しました。そこで、専門分野が近い研究者に論文の内容を知らせる電子メールを送りました。すぐ返事をくれた一人が、フランク・ウィルチェックさんという 2004 年にノーベル物理学賞を強い相互作用の理論で受賞した人でした。ウィルチェックさんが、2007 年の 1 月に湯川朝永生誕 100 年の記念講演を京都で行った時に、我々の結果を「これは物質構造の基本的理解の上での画期的な出来事である。」と紹介して下さったことは、我々にはたいへん心強いことでした。現在は、2007 年当時より 100 倍速い京コンピュータがありますので、先ほどの 4 カ月（3000 時間）の計算がたった 1 日でできることになります。そうすると、もっと詳細で大規模な計算が可能になるので、それを本格的にやろうと現在準備中です。最終的には、核力だけでなく原子核の性質も量子色力学から理解できればすばらしいと思います。

素粒子や原子核のようなミクロな世界の理解にスーパーコンピュータが果たす役割をお話ししました。今度は宇宙に目を転じて、ミクロとマクロの接点、特にビッグバンと物質創成について見ましょう（図 14）。観測と理論の進展により、宇宙がどのように始まり、

どのように進化してきたかということが、この10年の間に正確にわかってきました。宇宙が非常に熱い火の玉（ビッグバン）で始まったということは以前から知られています（図15）。最初は素粒子のスープだった宇宙は、膨張と共に冷えていきます。その過程で、クォークが集まって陽子や中性子になり、その陽子や中性子が集まって原子核になります。さらに原子核と電子が結合して原子が誕生します。我々の太陽系が誕生したのは、宇宙が始まってから91億年後。現在の宇宙年齢は、約137億年ということがわかっています。また、宇宙は加速膨張しているということもわかっています。2011年のノーベル物理学賞は、まさにこの加速膨張の発見に与えられました。

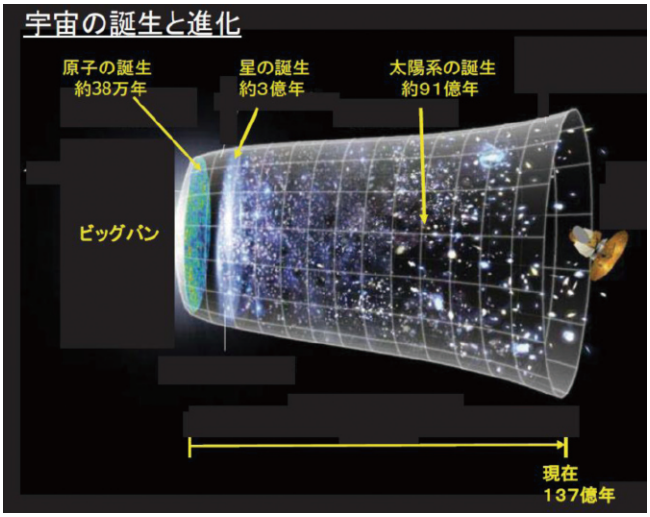


図14

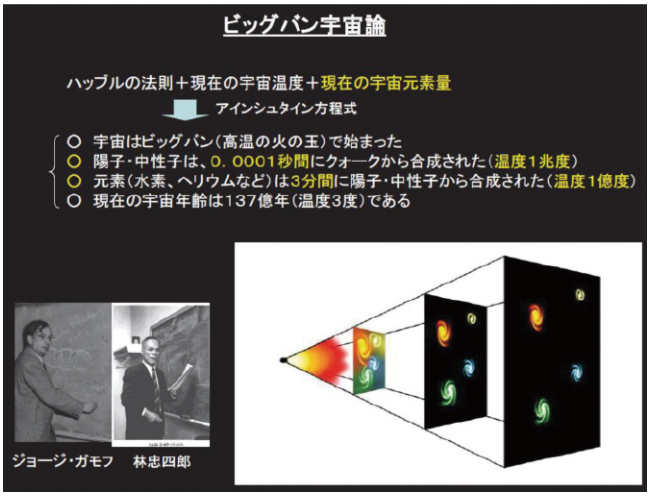


図15

さて、宇宙初期の高温状態では、核子は溶けてクォークとグルーオンのスープ（クォーク・グルーオン・プラズマ）になっていました（図16）。クォーク・グルーオン・プラズマが存在したのは、宇宙の始まりから約10^4秒まで、温度にすると約1兆度以上の状況だと考えられています。さらに、この4～5年の間に、スーパーコンピュータによる量子色

力学の数値計算で、通常の物質がクォーク・グルーオン・プラズマに溶解する温度が約 10％の誤差でわかるようになりました。

クォーク・グルーオン・プラズマを何らかの方法で実験室で生成し、その性質を観察できれば宇宙初期の様子がわかるかもしれません。その方法として、相対論的重イオン衝突があります。金や鉛のような重い原子核をほぼ光速にまで加速し、正面衝突させることで 1 兆度を超える高温プラズマを作ろうという実験です（図 17）。1980 年代前半から構想され、2000 年代に入って、そのような実験が実現しました。その 1 つは、米国ブルックヘブン国立研究所で稼働している相対論的重イオン衝突器（RHIC：Relativistic Heavy Ion Collider）です（図 18）。周長が 3.8km の加速器で、金の原子核同士を衝突させます。原子核が衝突すると、花火のように大量の粒子が生成されます。それらを検出器で捉えて、もとの衝突の様子を再構成するわけです。RHIC で得られた最近の大きな成果の一つは、理研の秋葉康之さんらを中心として行われた、高温プラズマの温度測定です（図 19）。原子核衝突により、クォークとグルーオンのスープが一瞬できるわけですが、そこから放射される光の

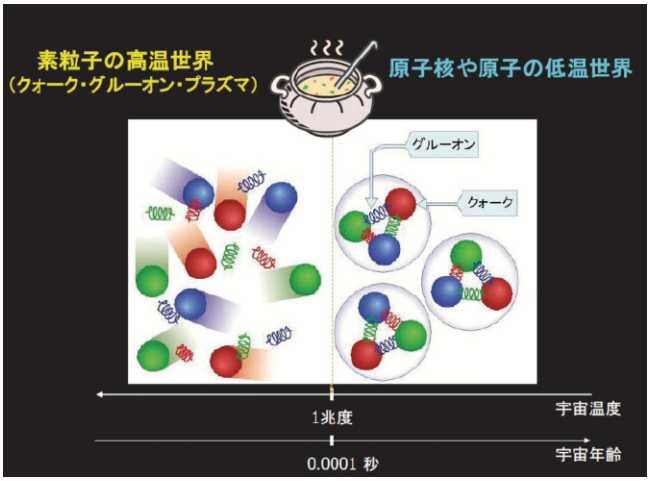


図 16

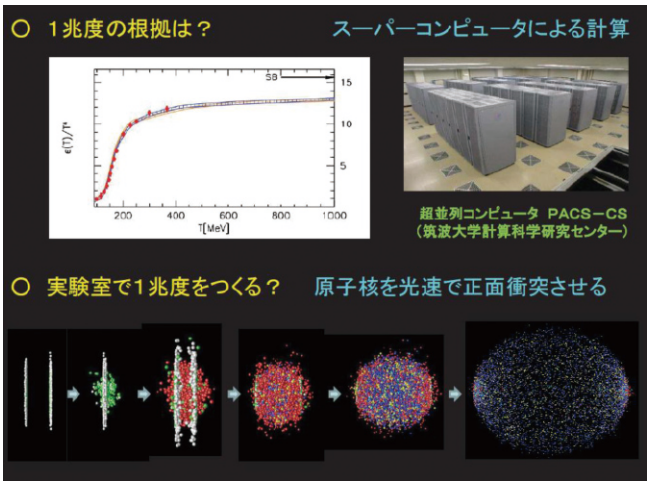


図 17

スペクトルや光の強度を測定して温度を読み取ることができます。その結果、高温プラズマの温度が数兆度以上ということがわかり、クォーク・グルーオン・プラズマが生成されていることが実証されました。他の測定により、温度だけでなく、高温プラズマの膨張の様子や粘性などを引き出すことも行われています。その結果、クォーク・グルーオン・プラズマは、これまで知られているいかなる物質よりも運動学的粘性の小さい、サラサラ流体であることもわかってきました。同様の研究は、ヨーロッパ共同原子核研究機構（セルン）で稼働している大型ハドロン衝突型加速器（LHC: Large Hadron Collider）を用いて行われています。地下に設置された周長 27km の加速器のなかで、鉛の原子核を衝突させる実験です。LHC では、これ以外に、ヒッグス粒子や超対称性粒子など未知の素粒子の探索が行われています。

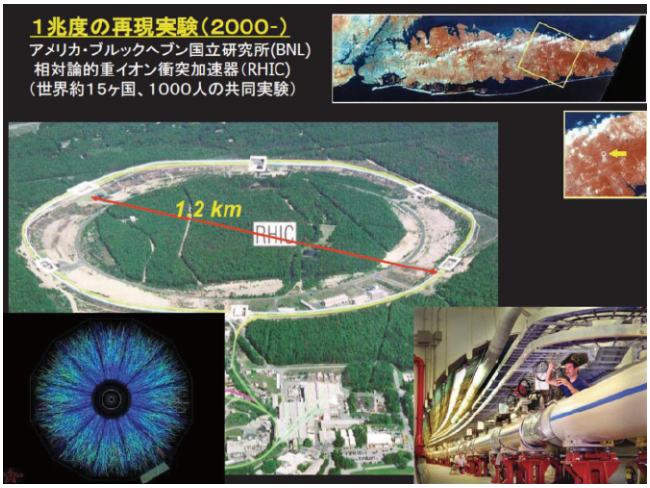


図 18

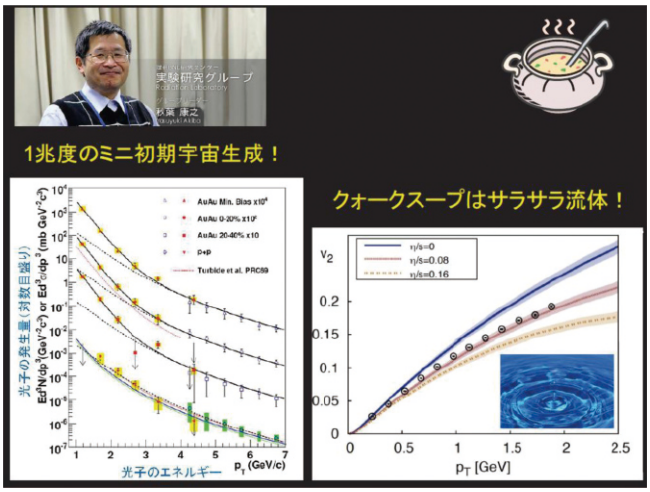


図 19

物理学は、謎が一つ解けると、また新しい謎が生まれる、ということの繰り返しで発展しています（図 20）。例を 2 つお見せしましょう。1 つ目は中性子星の謎（図 21）、2 つ目は暗黒物質の謎（図 22）です。中性子星というのは、半径が 10km 程度の星ですが、そ

の重さは概ね太陽の 1.4 倍程度です。非常に高密度の星で、内部の大半は中性子物質ですが、その中心核では、中性子が溶解してクォーク物質になっている可能性もあります。2010 年には、太陽の 2 倍程度の重さを持つ中性子星が見つかりました。このような重い中性子星の発見により、これまでの中性子星の内部構造の理解に変更が迫られる可能性が出てきています。また、中性子星の表面付近には比較的密度の低い中性子物質がありますが、その性質は、理研の仁科加速器研究センターで稼働している加速器 RI ビームファクトリーでの実験と密接に関係していますし、中性子星の中心核に現れると考えられているハイペロン物質の性質は、高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究開発機構が擁する大強度陽子加速器施設 J-PARC での実験と密接に関係しています。

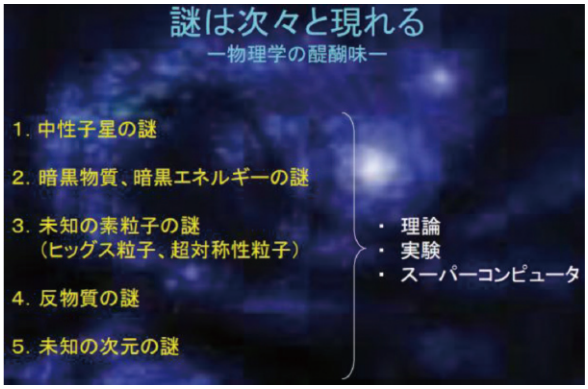


図 20

図 21

これまで話してきた陽子や中性子、それが集まってできた原子核というのは、実は宇宙に存在するエネルギーの全体からみるとほんの少数派で 4% しかありません。残りは、約 23% を占める正体不明の暗黒物質、約 73% を占める正体不明の暗黒エネルギーであることが様々な観測から間接的にわかってきています。宇宙のほとんどを占めているものが未だ正体不明というわけです。ここで、宇宙における大規模構造の形成に暗黒物質の存在が重要であること示す数値シミュレーション結

果をお見せします（図 23）。重力相互作用はするが光を発しない暗黒物質が通常の物質を引き寄せることで、観測されている宇宙の網目構造が良く再現されることが見て取れます。

以上、ミクロな世界とマクロな世界、そしてその繋がりをスーパーコンピュータの役割にもふれつつお話してきました。最後に、物理学者の日常を良く表した湯川秀樹博士の名言「未知の世界を探求する人々は、地図を持たない旅人である」（図 24）をお見せして話を終わらせて頂きます。

ご清聴ありがとうございました。

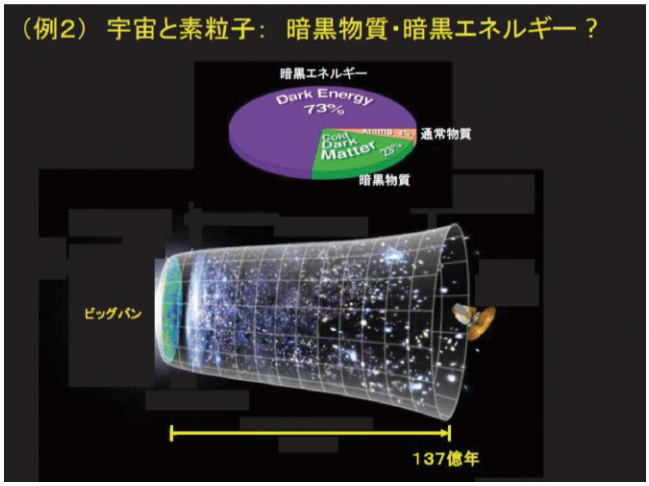


図 22

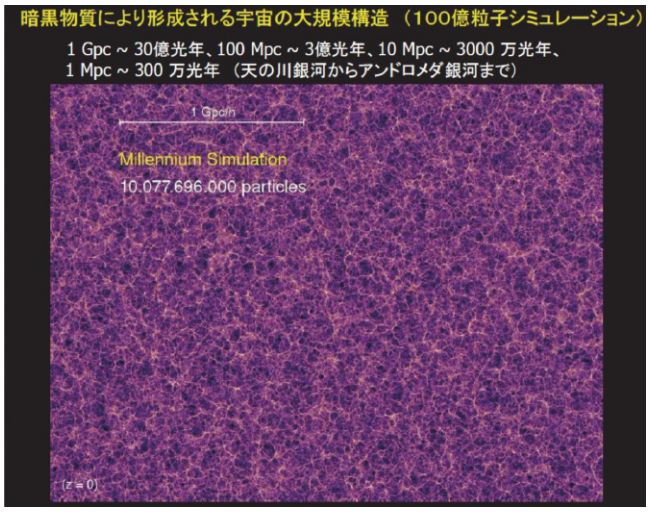


図 23

図 24

＊この講演会後、2012 年 7 月に、セルンの LHC 加速器を用いて、ヒッグス粒子と思われる新しい粒子を発見したという報告がありました。

司会　大分趣きの違う話を３題、聞いていただきましたが、あっという間に３時間が過ぎてしまいました。

最後に、日本アイソトープ協会副会長の田畑先生からご挨拶をいただきます。

「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田畑でございます。

今日は第２回の仁科記念シンポジウム「アイソトープ科学の最前線」ということで、講演会を開かせていただいたわけですが、まずは３人の先生、江沢先生、井戸先生、初田先生、すばらしい講演を本当に有難うございました。それから、この雨の降る天気の悪いときに、皆様方、御参加いただきまして、大変有難うございました。それから、この企画に関しては、今、司会をしていらっしゃる矢野先生がいろいろやってくださいまして、厚く御礼を申し上げたいと思います。

それで、最後ですから、余り時間をとってはいけませんが、二つのことだけをお話しさせていただきます。

先ほど小林理事長から三者の共同主催だということで、奇妙なところもあるから説明するとおっしゃっていただいたわけですが、仁科先生とアイソトープ協会の関係をちょっとだけ追加させていただきますと、先ほど来のお話のように、仁科先生が 1931 年、仁科研究室を理化学研究所に持たれて、1937 年に最初のサイクロトロンをつくられて、そのときに核物理だけでなくて、核医学、核化学、生物、農業関係、非常に幅広い学者さんをいろいろ集めて、それで幅広く研究をなさったということが非常に印象的でございます。先ほど初田先生が、仁科先生は理論だけでなく核物理のほうで実験のほうもこなしたと言われましたが、それ以上に幅が広くて、核化学、核医学、そういった分野も非常に早い時期に手がけていらっしゃったということが一つでございます。

それで、アイソトープ協会との関係を申しますと、1937 年のサイクロトロンでいろいろなアイソトープをつくられて、広い分野の方にそれを使ってもらって研究を始めたというのが最初ですけれども、1945 年、戦争が終わって、50 年に初めてアメリカから仁科先生あてにアイソトープが寄贈されて、それを受け取られたのが 1950 年 4 月 10 日だったと思います。そのときに最初に手がけられたのが、先ほど出てきましたけれども、核化学の

木村健二郎先生であります。

それから、アイソトープの利用が非常に重要だということを仁科先生は申されまして、それで、政府の関係の委員会ができたときに、その初代の部会長をされているわけです。1950年にたまたま、私が大学2年生ときにはじめて仁科先生の講演を東大の電気工学科の部屋で聞いたのですが、それが最初で最後でございます。それで、1951年に先生が亡くなってしまわれて、そのときにアイソトープ協会がスタートしました。ですから、アイソトープ協会の最初のところを仁科先生が始められたということでございまして、亡くなられた直後の1951年5月に日本放射性アイソトープ協会がスタートして、そのときにいらっしゃった茅 誠司先生が初代の会長ということです。アイソトープ協会との関係は非常に深くて、仁科先生にはそういう由来がございます。

最後に、今後のことでございますけれども、今回は第2回のシンポジウムというか、こういう会を持っていただいたわけですが、近い将来、また2年か3年後には次の会をぜひ持っていただきたいということを思っております。それは、仁科先生が非常に幅広い。先ほど申しましたように、核物理だけでなくて、核化学、核医学、それから生物、農学、といった分野までいろいろやっていらっしゃったわけで、恐らく将来の講演会というのは、そういう核物理以外の分野でのあまり知られていないお話の紹介をぜひやっていただきたい。そういうことで、仁科先生を偲ぶということを継続的にお願いしてやっていただけたらと思っております。

以上でございます。今日はどうも有難うございました。