

特集（日本の加速器の歴史）

日本の陽子線治療のはじまり

福本 貞義*

Opening of Proton Beam Therapy in Japan

Sadayoshi FUKUMOTO*

Abstract

Just after completion of the 12-GeV proton synchrotron complex at KEK in 1976, medical use of rapid-cycling 500-MeV Booster beams were investigated. Prof. Herman Suit of Harvard University recommended proton beam therapy, and soon it became clear that it was most suitable for Tsukuba. University of Tsukuba built and operated a medical research center with support of KEK. It included three activities, fast neutron therapy, proton radiography and proton therapy. It was showed clinically that the proton beam therapy is effective for deep-seated tumors such as hepatoma.

1. Dr. Herman D. Suit の陽子線治療の勧め

1976年9月に日米がん研究協力事業の高LET¹⁾放射線治療セミナー (US-Japan Co-operative Cancer Research Program High-LET Radiation Therapy Seminar) で、お医者さんや放射線物理の専門家について渡米した折、ボストンでの会食の席で、Harvard 大学医学部教授でボストンの Massachusetts General Hospital (MGH) の医師でもあった Herman D. Suit が、何故かお医者さん等を差し置いて、私の所に来て「つくばでは陽子線治療をおやりなさい」と強く勧めた。当時は高LET放射線で生物学的効果 (RBE²⁾) の高い速中性子が放射線抵抗性がんも含めて有効とされ、次世代の放射線治療を担うのは負パイ中間子 (パイオン) か高LETの重イオンかと言うのが一般的な空気であった。陽子線はRBEが、実体の全く異なるX線にはほぼ等しい低LET放射線に属していたので、このSuitの勧めは全く予想しないものであった。彼が指摘したのは、陽子線は低LET放射線であるので、これまで蓄積されてきたX線治療の膨大な効果と障害の情報が利用でき、従って当初から治る患者に照射出来る、ところがパイ中間子や重イオンにはこのようなデータはないので、毒性の試験から始めなければならない、そこで治る見込みのない患者に照射することになるが、がん治療の効果は最終的には5年生

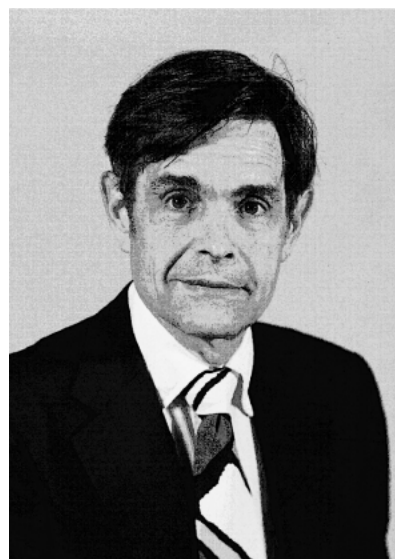


図1 つくばでの陽子線治療を勧めた Herman D. Suit
Harvard 大学医学部教授

存率で評価されるので、それまでに患者が死んでしまい、医療として (米国で) 承認されるのが何時になるか見当がつかない、と言うものであった。

この研究協力事業の高LET放射線治療部門では、5年間にわたり、年1回日本と米国での交互のセミナー (ワークショップ) が計画されていたが、1年延長されて1980年まで継続された。日本側の代表を癌

* 高エネルギー物理学研究所名誉教授、元筑波大学臨床医学系教授
(e-mail: sadayoshi.fukumoto@kek.jp)

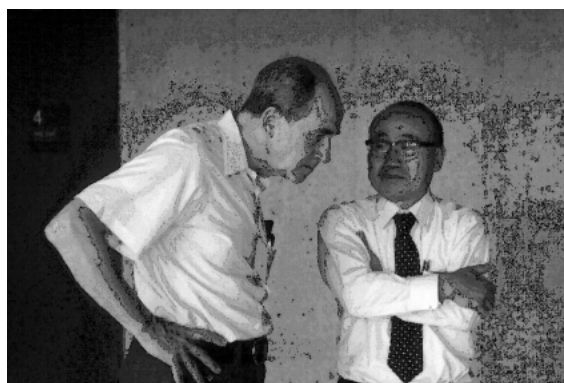


図2 梅垣洋一郎先生（右）と米国側代表 G. E. Sheline カリフォルニア大学教授

研究会付属病院の津屋旭先生³⁾、事務局を放射線医学総合研究所(放医研)の梅垣洋一郎先生が勤められた。当時放医研では高 LET 放射線である速中性子の治療が行われていた。そして高エネルギー物理学研究所(KEK, 現高エネルギー加速器研究機構)の大型陽子加速器⁴⁾が稼動を開始した時期で、梅垣先生から高エネルギー陽子の医学利用の申し入れがあった。そして1976年の米国での最初のセミナーのあと、北アメリカの大型加速器施設への team visit が行われた。すなわち Lawrence Berkeley Laboratory (LBL) でのセミナーの後、同所で開かれるアメリカでの国際放射線学会 (Particles and Radiation Therapy Second International Conference) 出席と、北アメリカの大型加速器施設の訪問が企画され、津屋先生、梅垣先生と放医研の恒元博先生や稲田哲雄さん、河内清光さん、パイ中間子治療の東大医学部坂本澄彦先生ら8名のチームに加速器関係者として同行した。

元々 KEK では遅い繰り返しの 12 GeV 陽子シンクロトロン (主リング, MR) の入射器として建設された、早い繰り返し (20 Hz) のシンクロトロンであるブースターは、500 MeV 陽子を主リングに9パルス入射した後、次の9パルス入射までの、主リングの加速・取り出し・入射磁場への復帰の時間帯には陽子を加速しなかった。しかしこの時間帯には、約80パルスのビームを加速することが可能で、この500 MeV 陽子を利用するブースター施設利用計画が、この渡米の前に進行していた。そして以前から利用を計画されていた原子核グループは撤退したけれど、東北大学が強く推進したパルス中性子、カナダ TRIUMF で実験中の中間子と並んで医学利用を実施することになり、実施する医療機関としては筑波大学にお願いすることになって、私はその KEK 側の窓口に手を上げた。それは昔結核を経験して、臨床医学と物理の方法

論の違いを認識したことと、折角高額の国家予算を使い、皆が力を尽くして建設した加速器が、より有効に使われるためである。

医学利用の中身として、当時 KEK 500 MeV 陽子ビームにより、パイ中間子の治療が可能との意見があったので、急遽専門家にお伺いしながらその発生量を概算してみたが、 $2\mu\text{A}$ のビーム強度では治療に必要な数のパイ中間子はとても得られそうにない結果となった。負パイ中間子が注目されたのは、体の組織を透過中は他の荷電粒子と同様に電離によりエネルギーを失うが、運動エネルギーを失い停止すると、原子核と反応して核が破碎され、いくつかの α 粒子などの重イオンが、質量が転化したエネルギーを持って放出される、いわゆるスターを形成するからである。このスターががんの中で形成されると、重イオンの飛程 (Range) は短いので、局所に線量が集中されることから、大きな治療効果が期待されていた。

国際放射線学会での発表では、Los Alamos National Laboratory (LANL) の負パイ中間子と LBL の重イオン治療には、演者が次々登壇したが、陽子線では H. Suit が1人地味に発表しただけであった。そこで将来はパイ中間子か重イオンのいずれかとの強い印象を受けていたので、後で訪問したボストンでの Suit の勧めに大きな衝撃を受けると同時に、もし陽子線が良いのなら必要なエネルギーと、特にビーム強度がパイ中間子生成より遥かに少なくよく、KEK でも容易に実現できるとの希望が生れた。

LBL では 184 インチシンクロサイクロトロン (p: 740 MeV, α : 230 MeV/u) の水平固定ビームで、コンピューター制御の椅子に座った患者を照射する施設を見学した。この加速器は人工中間子を作ったことで知られているが、医学のフェンド (NIH) で建設されたもので、 α 粒子を使って 1992 年にシャットダウンされるまで主に脳下垂体の治療を行っていた。

次に Stanford 大学の建設中のパイ中間子施設を見学した。専用加速器として同じ加速管で数回加速する 500 MeV 還流型電子リニアック (Recirculating Electron Linac) を調整中で、パイ中間子治療のために、円柱状中性子遮蔽体の端部近くの軸上のターゲットで発生した中間子のうち、軸と直交する全周の分を超伝導の 60 チャンネルの空芯コイルで縦方向に偏向させて、中性子遮蔽体を避けてその周辺をとおり、再び空芯コイルで軸に向って偏向させ、遮蔽体に対してターゲットと対照的な位置の患者のがんに全周からパイ中間子を集中して照射する、Stanford Medical Pion Generator (SMPG) を建設中であった。加速した電子

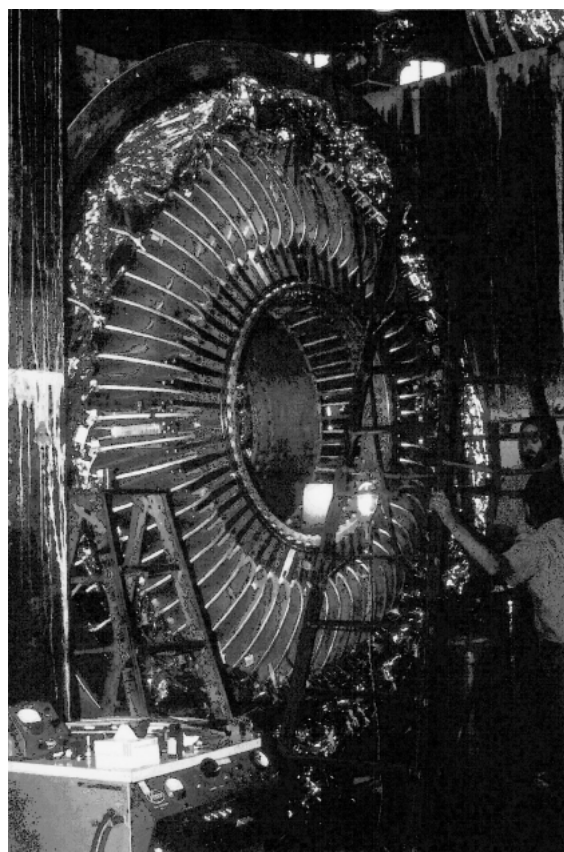


図3 組み立て中の SMPG (Stanford Medical Pion Generator) の超伝導空芯コイル

を繰り返し加速するために、加速管の上流に戻すビームダクトの細さに驚いたが、このリニアックはしくじった模様で、SMPG の成功が伝えられたにも拘らず、Stanford 大学ではパイ中間子の臨床研究は行われなかった。SMPG は後のスイス Paul Scherrer Institute (PSI) のパイ中間子発生装置 Piotron のモデルとなった。

LANL では、800 MeV 陽子リニアック建設の最初からがん治療がその目的のひとつに掲げられてきた。Stanford 大学とは異なり、ターゲットで発生したパイ中間子のうち1方向の分しか集めない、通常のビームチャンネルであったが、イオン源の担当者との話が弾んだため、見学の機会を逸した。

当時世界最大の陽子加速器を擁した Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab) に立ち寄った後、陽子線治療を実施している Harvard Cyclotron Laboratory を訪問した。使用している加速器は 160 MeV シンクロサイクロトロンで、中間子を人工的に作る目的で建設されたけれども、エネルギーが足りないことが分かったので、早い段階で医生物学研究に転用され、物理の A. M. Koehler により陽子線治療が導



図4 Fermilab のシンクロトロン見学、左から津屋旭先生、浦野さん（在米）、森田さん（放医研）右端が説明をする大沼昭六さん

入されることになった。欧米人に多く、日本人には極めて稀な眼の脈絡膜のがんは、それまで眼球を摘出するしかなかったが、陽子線で視力を保持したまま治療出来たので、陽子線治療が社会的に認知されることになった。シンクロサイクロトロンの問題点の一つは低い取り出し効率で、5% かと尋ねたら2% といわれ、放射線のレベルが高いからとすぐに加速器室から出されてしまった。

最後に訪問したのがカナダの中間子工場 (Meson Factory) TRIUMF であった。加速器は取り出し効率を向上させるため、陽子の代わりに H^- を加速して薄膜で陽子に荷電変換して取り出す 520 MeV のサイクロトロンであるが、加速中に磁場により H^- から電子が剥ぎ取られるのを防ぐため、平均 0.46 T にしているので、かなり大きな磁石となっている。LANL と同様の1方向のパイ中間子しか集めないチャンネルであった。薄膜の位置により取り出しビームのエネルギーが可変となる。

帰国後 Herman Suit からの助言を、諏訪繁樹所長と西川哲治加速器主幹に報告し、肯定的な評価を頂いた。

翌 1977 年、東京で開かれたセミナーに出席するため H. Suit が来日したので、つくばへの来訪を要請した。KEK で陽子線治療のコロキウムをお願いしたが、出席者はごく少数であった。その直後西川所長とかなり時間をとって話しあってもらった結果、お二人は陽子線治療の可能性と、成果をあげてから次の段階に進む着実な研究方法で意気投合された。

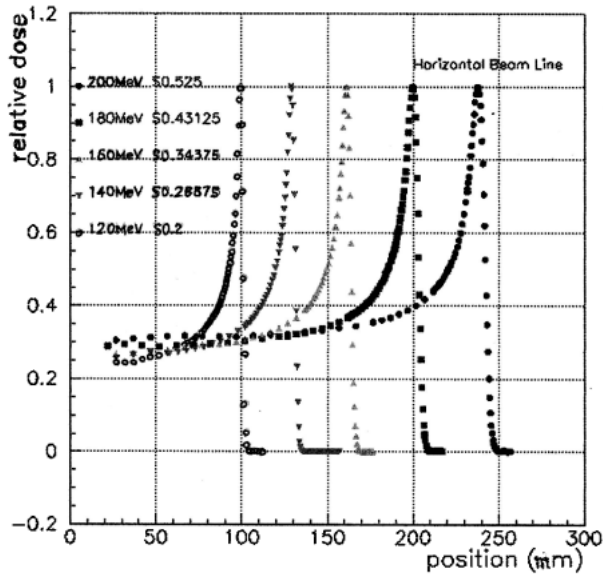


図5 120～200 MeV 陽子線の水中での線量分布. 横方向に広げるため, 0.2～0.525 mm 厚さのW板を透過させている.(若狭湾エネルギー研究センター久米恭氏提供)

2. 陽子線の特徴

高エネルギーの陽子によるがん治療を早くも1946年に提唱したのは, 後に Fermilab の初代所長になった R. R. Wilson であることはよく知られている⁵⁾. 陽子(重イオンも含めて)はX線や電子と異なり, 媒質中でそのエネルギーに対応した飛程を持ち, 電離作用は入射面からしばらくはほぼ一様(Plateau)で, 飛程の終端近くで Bragg Peak と呼ばれる急上昇を示した後急速に零となる. 放射線の生体に及ぼす影響は, 電離作用によるものであるため, がんにも Bragg Peak を合わせれば効果的な治療が出来る. しかし R. R. Wilson が提案した頃には必要なエネルギーまで必要な強度の陽子を加速する加速器はなかった.

そして電子リニアックの発達により, X線による1日に約2 Gyを週5日, 4乃至6週間照射する分割照射と, 回転ガントリーにより色々な方向から照射する多門照射が, 標準的な放射線治療になった. 照射を大線量1回とせず小線量に分割するのは, 経験から晩発障害を避けるためと言われている. 放射線治療は, 正常細胞とがん細胞の僅かな放射性感受性の差や, 分裂周期の差を利用すると言う説明もあるが, 実際には多くの場合線量をごん細胞に集中すると共に, 正常組織の被曝を出来るだけ低減させようとしている. この目的には, 媒質中で(ビルドアップの後)ほぼ指数関数的に減衰するX線よりも Bragg Peak を持つ陽子

線の方が明らかに有利である. 但しいずれ場合でもがんに線量を集中するためにはがんの位置と形状が正確に知られていることが, 大前提である.

がんは3次元的な広がりを持つため, 陽子をその形状に応じた分布にしなければならない. Harvard 大学では, 横方向には重金属薄板を透過する際の多重クーロン散乱で, 縦方向には厚さの異なるプラスチック板を次々挿入してエネルギーの広がりを作って, Bragg Peak を広げていた(Spread-out Bragg Peak, SOBP). 最大エネルギーでも水中の飛程が16 cmと深部がんには不足したので, 主として眼, 一部頭頸部の治療を行っていた. 早い時期から眼の治療に成功したのは, CTが無くては眼のがんは, 位置, 形状が分かったからではなかったかと想像している.

世界で初めての陽子線治療は1957年にLBLで始められたけれども⁶⁾, すぐに α 粒子に移行した.

3. 治療現場の見学

次の米国でのセミナーは1978年6月にフィラデルフィアで開催された. この機会を利用して, 本当につくばで陽子線治療を推進してよいかどうかを確認するため, セミナー終了後 Brookhaven National Laboratory を訪ねてから, 再度 Harvard 大学の Cyclotron Laboratory に行った. この時は治療現場を見学することが出来た. 患者は学齢前と思われる少女で, 背骨の近くのがんがあり, 他の治療法はないということであった. 治療に使われたのは, サイクロトロン室からコンクリート壁の孔を通して出てくる水平ビームで, 照射野の確認はフィルムで行われていた. この照射室は眼の治療にも使われ, 頭頸部治療は別の照射室で行われていた. 陽子線が照射されると, 何か感じるのではないかと少女の表情に注目していたが, 全く反応を示さなかったため, これは良い治療法と思った. 少女は父親に肩車されて帰っていった.

その後も重イオンと速中性子の治療の現場を見せて貰ったのは, いずれもアメリカであった. Neイオンの治療は, LBLでJ. R. Castroが説明をしてくれた. CTで写っているがんの周囲に彼がマジックで適当に線を引き, その部分を照射するよう指示するので, 線の引き方を尋ねたら, がんはCTで写らないところにも広がっている, どのがんではどの方向にどの程度広がっているかの判断は医師の経験によるとのことであった. 昼には休憩するであろうとずっと付いていたら, マシントイムが厳しかったためか, 休み無しで照射を続け, とうとう昼食を食べ損なってしまった.

速中性子治療を見たのは Fermilab であった. 入射

器の 200 MeV 陽子リニアックの 3 本目と 4 本目の加速管の間に偏向電磁石を入れて、66 MeV の陽子を水平面内で 90 度曲げ、Be ターゲットに当てて前方に発生する中性子を利用する。患者は通いで、対象は主に放射線感受性の低い前立腺がんであった。水平の固定ビームで、パンフレットでは患者は椅子に座って照射されていたが、実際に見た時はターンテーブルの上に立っていた。固定を兼ねて胸のあたりに台があり、見学した患者は、それに載せて文庫本のような本を読みながら照射を受けていた。ターンテーブルを回転させ、照射野を決めるコリメーターを交換しながら続きに 3 方向から照射した。ロシアの人たちも提案しているけれど、こうすれば大きな回転ガントリー無しで多門照射が出来る。但し多くのお医者さんからは位置決め精度が悪いと言うことで賛同は得られない。

4. つくばでの陽子線治療の始まり

発足間もない筑波大学病院の整備に忙殺されていた放射線科の先生方に協力して、KEK に作る施設のレイアウトを作り始めた。ブースターからの 500 MeV 陽子を長いビームトランスポートを経てビームダンプを兼ねたパルス中性子源に入射する直前に、ビームの下流に向かって左に曲げると医療用、右に曲げると中間子施設とした（付図参照）。陽子線治療には 250 MeV 又はそれ以下のエネルギーにしなければならないが、そのエネルギーでブースターから取り出すことは出来ず、非効率の誇りを覚悟してグラファイトのディグレーダーを貫通させて、減速することにした。後に PSI も同様な方法で減速していたし、現在稼働中の陽子線治療用サイクロトロンは全てこの方式でエネルギーを変えている。

放射線部長の秋貞雅祥先生は診断が専門であられたが、医学利用には積極的に取り組んで頂いた。丸橋晃さんが着任し、放医研から稲田さんが移られて、そして KEK の共通系主幹から筑波大学の副学長となられた三浦功先生が計画の取り纏めされるようになったので、私はもとの KEK 12 GeV PS の入射器の専念することになった。

ところが筑波大学が概算要求のために作った案は、速中性子治療と陽子線診断 (Radiography) であったので、これに将来性を期待して陽子線治療を加えて頂いた。速中性子治療には、すでに日米のセミナーで、アメリカ側からそれ程有効ではないとの報告も出されていた。

このようにして 1980 年に粒子線医科学センターが発足する運びとなり、初代センター長には KEK 初代

所長の諏訪先生が就任して施設の建設にあたられた。そして治療には国立がんセンター放射線部長の北川俊夫先生が、教授の席が無かったので、助教授として移ってこられた。以前に北川先生には、物理屋から見れば、陽子線は明らかに有利ですよと申し上げた時に、疑わしそうに、本当ですか、と言っておられたので、まさか来られるとは予想していなかった。

KEK 12 GeV PS は建設時には臨床研究を全く想定していなかったので、臨床研究に要求される安定な運転を危惧する声があった。それに対して北川先生は加速器打ち合わせに出席して、もし陽子線が照射出来なくなったら、代わりに X 線で照射を継続するので、加速器には一切迷惑はかけないと明言された。そして後に先生は、世界の物理研究用加速器施設の中で、最も優遇されていると述懐されていた。

1982 年に初めて動物を照射する時、加速器の制御室にいた所、照射時間が 30 分に及んだ。500 MeV を 250 MeV に減速するのに、グラファイトを透過させる方式を採ったため、ビームの角度と運動量が拡がり、電磁石とスリットで使えるビームを選別した。このためビーム強度不足の恐れがあった。そこで 30 分もかかるのではと照射の現場を見に行ったら、何匹かの鼠が板にはりつけられていて、皮膚反応を見るため、人の治療よりは遥かに多い線量を照射したとのことではあった。治療に必要なビーム強度は、照射方法によって異なるが、どの場合でも 10 nA あれば十分で、照射は通常は 1, 2 分で呼吸同則の場合でも完了する。

実は放医研で速中性子治療用 70 MeV サイクロトロンを使って、1979 年から眼のがんの陽子線治療が試みられたが、日本人には稀ながんのため本格化しなかった。

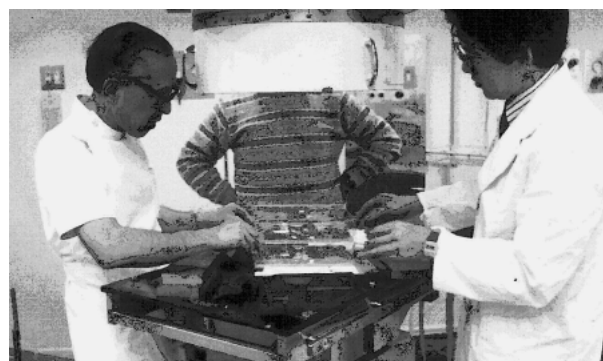


図 6 陽子線照射のために鼠を準備中の北川俊夫先生 (左)

5. 深部がん治療

日本人に多い肝臓がんは、従来の X 線治療の適用外とされていた。ところがどうしても手術を拒む患者がいて、北川先生は悩まれた後、陽子線を照射された。経過は先生が驚かれるほど良好であったが、他のお医者さんに陽子線はいいですよと言ったら、北川先生が全力投球されたら X 線でもいい結果が出ますよと言われてしまった。

治療の臨床研究開始後の早い段階で、北川先生から、Bragg Peak の前方で線量が急減するのはよいが、Peak の上流 (Plateau) の線量を減少させられないかとの要望があった。単色の陽子では Plateau の線量は Peak の 1/3 程度と低いけれども、Bragg Peak を広げるためにエネルギーの異なる陽子を重畳すると、Plateau は Peak の 7~8 割にまでなり、これは物理的に避けられないと返事をした。結局治療は垂直ビーム 1 門で出発したが、当初陽子線診断用に建設された水平ビームを治療用に改造して、水平・垂直の 2 門照射が行われた。

1985 年 1 月 24 - 25 日に Fermilab で、Medical Workshop on Accelerators for Charged-Particle Beam Therapy と言う、実質的にはアメリカ中西部での陽子線治療旗揚げのワークショップが開かれ、国外からはつくばと、陽子線の生物学的効果が X 線のそれとほぼ等しいことを明らかにしたスウェーデンのウプサラが呼ばれた。そこで治療については北川先生、加速器と装置については私が話すことで出席を予定していた所、出発直前に先生が、急用で行けなくなった、スライドを渡すから代わりにしゃべって来いとこのことで、一人で出席した⁷⁾。ところが質問が止まらず、とうとうねをあげて、これ以上のことは北川に問い合わせてくれと逃げざるを得なかった。質問の雰囲気は、何となくつくばの結果を疑わしいとするものであったので、後で誰かに何故と尋ねた所、陽子線治療は眼には有効だけれども、深部がんには良くないというのが一般的な認識だと教えてくれた。たしかに CT の無い時代に、X 線と同じように照射したのでは、良い結果は得られなかったのは当然であろう。

肝臓がんが多いのは、多分に日本の特殊事情によるものようで、最近ではアメリカと同じく前立腺がんが増加している。肺がんも重要な標的であろう。

6. パイ中間子と重イオンのその後

1980 年 11 月に最後の日米セミナーが、ハワイで開催された。これには LANL でパイ中間子治療を主導

していた M. M. Kligerman は出席はしていたが、すでに他に転出していたので、パイ中間子の先行きに不安を感じた。LANL に続いて TRIUMF、それから PSI と、世界の中間子工場はパイ中間子の臨床研究を行ったが、いずれも期待した効果が得られず、中止した。後に PSI の E. Pedroni に何故効果が上がらなかったかを尋ねた所、ビーム強度が不足で質の悪いビームまで取り込んで照射しなければならず、従ってがんを正確に照射出来なかったことをあげた。PSI では 590 MeV 陽子のうち、20 μA がパイ中間子生成ターゲットに入射されていた。パイ中間子の寿命が 2.6×10^{-8} 秒と短いので、中性子遮蔽体を避けてがんに到達するまでに、かなりの部分がミューオンに変化する。負パイ中間子が核に入って核反応を起こし、その際生成したエネルギーを持った重イオンのスターが形成されるのは、重い核の場合で、人体組織を構成する C, N, O など軽い核では、核反応で生成されたエネルギーの過半は中性子が持ち去るので、がんには線量は集中しない。

LBL が使用した重イオンは、Ne が主であった。セミナーで Ar や Si の生物学的効果の大きさが発表されるごとに、確かにがん細胞に対する効果は大きいけれども、正常組織も損傷されるのにとの疑問が消えなかった。重イオンでは C から Ne, Ar まで選択の範囲が広いのに、何故 Ne を選択したかをずっとあとで J. R. Castro に尋ねた所、LBL でも初めに最も軽い C かそれとも Ne かの議論があって、最も重イオンらしい重イオンとして Ne を選択したとのことであった。J. R. Castro には不本意であったようであるが、期待された効果が得られなかったと評価されて、研究費が停止され、加速器 BEVALAC もシャットダウンされた。放医研はこの経験を引き継いで、C を選択した。

7. ま と め

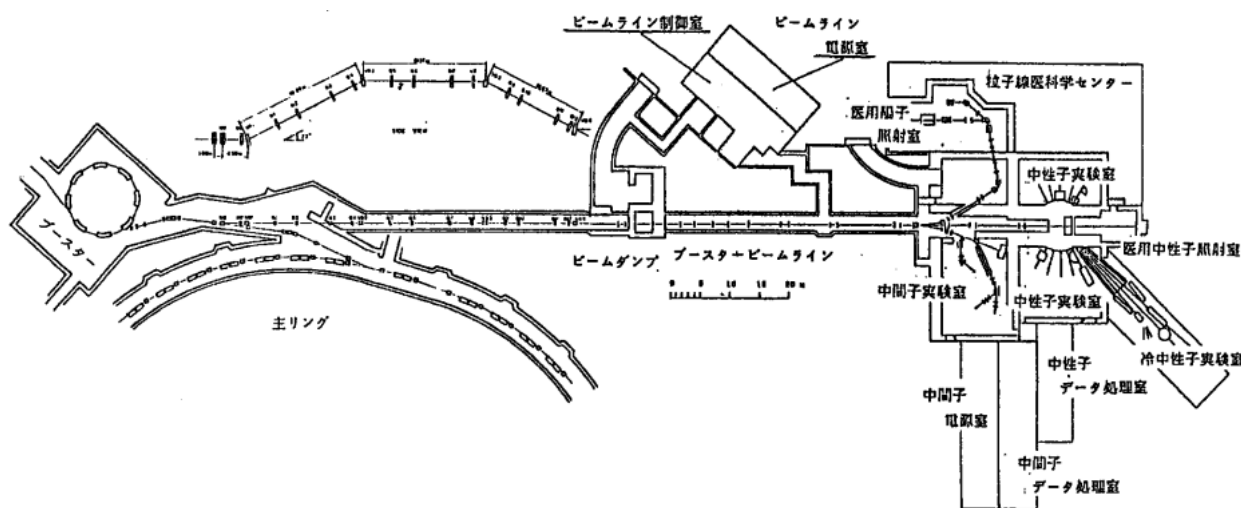
KEK のブースター施設利用の中の医学利用の内容を模索していた 1976 年に、日米がん研究協力事業で渡米した際、Harvard 大学の Herman D. Suit から陽子線治療を勧められた。当時の次世代放射線治療の関心は、負パイ中間子と重イオンであったが、KEK では陽子線なら実現可能であったので、医学利用の主体であった筑波大学の、速中性子治療と陽子線診断の計画に、陽子線治療を加えた。KEK は施設の建設と運用に全面的に協力し、日本のみならず世界に先駆けて、眼のがんだけに有効と評価されていた陽子線治療が、肝臓がんのような深部がんでも臨床的に優れていることを明らかにした。

負パイ中間子治療は、米国のLANL、カナダのTRIUMF、スイスのPSIで臨床研究が行われたが、期待された結果が得られず中止された。米国LBLのNeなどの重イオン治療も中止された。

注と参考文献

- 1) LETは「Linear Energy Transfer 線エネルギー付与」で、粒子や光子が媒質中を透過する際、単位長あたり粒子等から媒質に付与されるエネルギー。単位はkeV/ μm で表される。粒子の種類だけでなくエネルギーにも依存する。水中のLETは、 ^{60}Co ガンマ線が0.2 keV/ μm 、陽子はPlateauで0.4 keV/ μm である。
- 2) RBEは「Relative Biological Effectiveness 生物学的効果」で、細胞に標準の放射線（例えば250 kV X線）と対象の放射線（例えば陽子線）を照射したとき、同

- 一の生存率（例えば10%）となる標準と対象の放射線の線量比。陽子は1.0~1.2、速中性子は3程度であるが、細胞の種類や標準の放射線、生存率に依存する。LETが10 keV/ μm 以下ではRBEはほぼ1で、それからLET増加と共に増加し、100 keV/ μm 付近で最大の2~3となり、LETが更に大きくなると再び減少する。
- 3) 所属、役職はすべて当時のもの。
- 4) 木村嘉孝, INS-ES から KEK-PS の誕生 (II) 「加速器」Vol. 2, No. 1, 2005 (2-10)。
- 5) R. R. Wilson, Radiological use of fast protons, Radiology, 47: 487-91, 1946.
- 6) Particles, No. 35, January 2005. なお施設毎の粒子線治療患者統計等は次のホームページで見られる。
<http://ptcog.mgh.harvard.edu/>
- 7) S. Fukumoto, Proton Beam Therapy at Tsukuba, Proc. of a Medical Workshop on Accelerators for Charged-Particle Beam Therapy, 1-5, Fermilab, January 1985.



ブースターシンクロトロン（左端）の500 MeV陽子はビームラインを経てパルス中性子源（右端）に導びかれるか、その直前に医学利用施設（上）か中間子施設（下）に分岐される。（KEK 入江吉郎氏提供）