

実現可能か？ 民間資本による重粒子線がん治療施設

熊田 雅之*

Mission Impossible?

—Accelerator based Advanced Heavy ion therapy facilities by Private Sector—

NIRS Masayuki KUMADA PhD

Abstract

Highly advanced technologies of a particle therapy of cancer are reviewed. The studied particles are photon, electron, pion, neutron, proton, anti-proton and carbon ion. An attractive feature of a heavy ion therapy system is specially emphasized. It is found that there is a bottleneck of national scale spread. A naive intuition and examination suggest the bottleneck is a throughput of patients where this issue has been little discussed in the past. A possible straightforward solution is mentioned.

1. はじめに

がんの重粒子線治療では理論上その高い生物効果や体内での散乱の少なさやX線（フォトン）抵抗性腫瘍に対しての特別に優れた治療効果から他の最先端X線治療や陽子線治療に比べても、副作用が少ない極めて良好ながん治療が可能だ。放医研における13年間にわたる治療患者3000人以上の臨床結果はHIMAC（放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療センター）施設計画時の当初の予測が正しいことを示している。重粒子線の治療はまだ黎明期にあり、技術的にも未完成な部分が多々あるにもかかわらず優れた結果を出し続けていると重粒子線治療の関係者は確信を深めている。また一方で13年間という短い時間ではその社会的評価はまだ十全ではなく、その情報が十分社会にいきわたっていないこともあり放射線腫瘍医からの評価がまちまちである事も否定できない。著者らは科学技術振興機構(JST)のプリベンチャー事業。”超強力永久磁石を応用した医療用加速器の小型化”で2002年から2005年研究成果最適移転事業のグラントを受けてから重粒子線治療とその役割と治療への効果、その社会的役割と経済的効果とその実現への方法を検討してきた。ただ陽子線治療施設の普及は比較的順調なもの重粒子線の普及は足踏みをしているのが

実情といわれている。拙稿では重粒子線治療のライバルである最先端のフォトン治療等を振り返りつつ、また陽子線治療を復習しながら重粒子線がん治療を社会に普及を阻む障害を考察し、その解決策を模索する。

2. 重粒子のライバル・フォトンがん治療装置

A. Cyberknife

Cyberknife¹⁾は患者の負担を最小限にしたコンピュータとロボットをフルに駆使した最初の高性能強度変調IMRT(Intensity Modulated Radiation Therapy)でスタンフォード大学のJohn R. Adlerによって1987年に実現された。その特徴は()サブミリの照射精度、()動体追跡能力、()患者にとって苦痛である頭部の固定具が不要になったことである。それ以前は固定に60分近く必要だった。頭頸部の治療からはじまり現在は体幹部も治療も可能となっているQOLの高い治療装置だ。なんとといっても最初にロボットを採用したところがアドラーの功績だ。

B. トモセラピーと後継機

1994年ウイスコンシン大学のロック マッキーは2本の異なるビームを使って診断と治療をほぼ同時に行う装置を考案した²⁾。その模式図が図1である。ロックキーはメガボルトビームの採用により低線量を維持し

* 放射線医学総合研究所
(E-mail: mkumada@gmail.com)

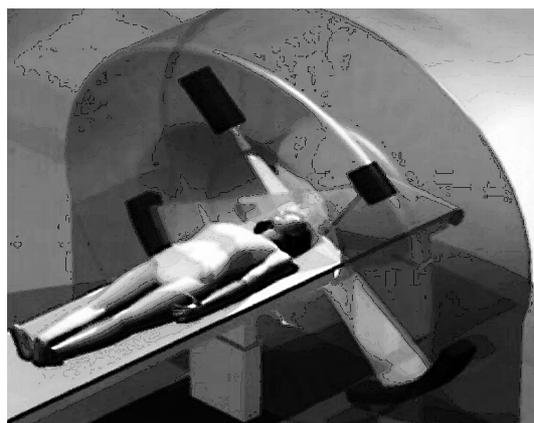


図1 人気の高いマッキーのトモセラピー

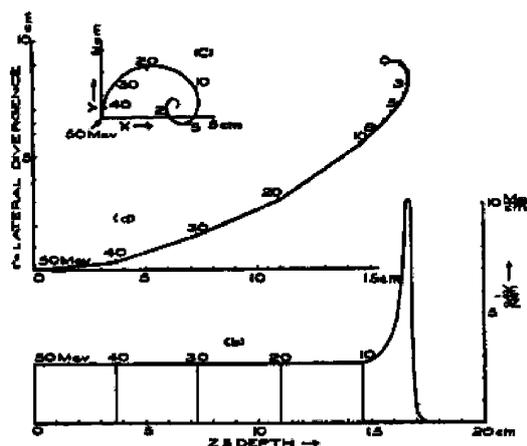


図3 Bragg Peak of electron under magnetic field from Bostick's original paper.



図2 ミュラー教授の新構想 TOM'O 5

つつ解剖学的コントラストが高くかつアーチファクトの少ない良好な画像を得ることができた。現在、欧米はもちろん我が国で最も人気のある最先端装置だ。これを元にエルランゲン大学のミュラー教授はその発展型として図2のような大口径かつ5本のフォトンビームを同時照射可能な TOM'O 5 を構想している³⁾。また TOPOS という二本の光による等高線モニター装置も採用される予定だ。

3. 粒子線がん治療装置というもの

A. 磁場中の電子は“貧者のブラッグピーク”を示す

電子ビームが高磁場中ではブラッグピーク (Bragg Peak) に類した軌跡を示すことは 1950 年に Bostick によって提案され“貧者のブラッグピーク”として知る人ぞ知る現象で現在も研究は継続されている。原論文は W. H. Bostick, “Possible techniques in direct-

electron-beam tumor therapy,” Phys. Rev. 77, 564–565 (1950) で図3にその“手計算”による水のなかのエネルギー損失を示す。1950年の時代ではまだ電卓さえも存在しなかった時代だ。ただし世界最初の機械式計算機はパスカルで1846年そして電気式計算機はペンシルバニア大学で1946年に完成したというのがこれは軍事目的の弾道計算が用途であったので Bostick には利用できなかったことだろう。

超伝導電磁石がより安価となった現在ではコストの安い電子ビームでブラッグピークができればガン患者にとっては福音だ。電子ビーム加速器の発展により安価な超小型電子源が可能になったからだ。

B. π 中間子は失敗した

π 中間子による細胞の殺傷力は大きい。中間子は湯川博士が予言したという事で一時期日本でもずいぶん期待された。実験研究はロスアラモス研究所 (LANL) で精力的に行われた。読売新聞は我が国からの研究者の派遣に援助を行い私の知り合いもそのお世話になった。ロスアラモス以外にもカナダ、スイス、ロシアで計1100人の臨床試験が行われた。しかし結果は副作用が思わしくなく1990年代前半には計画は終了した。粒子線治療のうまくいかなかった不幸な例のひとつである。

C. 中性子によるがん治療はしぶとく生きている

中性子も副作用が強いが放射線抵抗性の腫瘍には効果が認められているので現在でもフランス(2)、アメリカ(2)、ベルギー(1)、韓国(1)で治療は行われており治療を受けた患者は総計1万3千人を超える。特に活発であるのが Fermilab⁴⁾である。その施設は一度シャットダウンされたが北イリノイ大学 (NIU) が Fermilab の中性子線治療装置を復活させ財政的サポートをすることとなった^{5,6)}。NIU はその後陽子線

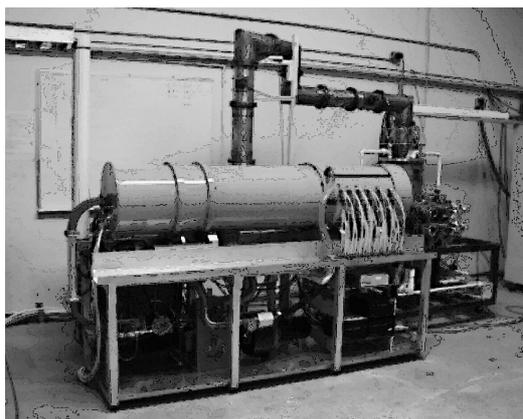


図4 Linac system's compact 2.25 MeV linac "RFI".

治療施設の計画を進めている。

中性子のもうひとつの治療法は Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) である。日本はこの分野は進んでいると言われていて国内では総計約 500 人がアメリカでは 140 人治療を受けている。中性子は原子炉から供給されてきたが不便なことから加速器ベースの中性資源が切望されている。図4はこのように目的で LANL からスピアウトした Don Swenson のアメリカのベンチャー企業 Linac Systems 社が開発中のもので完成が近い⁷⁾。

D. 反陽子治療は可能か？

反陽子治療は炭素イオンと同等以上の Bragg Peak を示す⁸⁾。問題は反陽子を作るには高価で大型の大強度高エネルギー陽子線が必要なことと生成された反陽子を治療施設まで十分な量を輸送可能かどうかである。反陽子を貯蔵する容器としては Penning Trap 瓶が Lewis によって考案され運搬可能であることを示すために CERN から Fermilab に運ばれた。これらを図5a, b に示す。先の PAC07 (2007年・米国加速器会議) で開発責任者の Holzscheiter 教授に尋ねてみるとこのときの反陽子数は1000個のオーダーで実用的な強度にはほど遠い印象だ。細胞を使った反陽子ビームの生物実験は年2週間ほどマシンタイムが取られ CERN で実験が行われている。最近では Holzscheiter 教授はむしろ重粒子線治療に興味をもっているようだ。

E. 陽子線装置・アラカルト

がん治療用の陽子線加速器のほとんどはベルギーの IBA (Ion Beam Accelerator) のものだ。世界の陽子線がん治療装置のマーケットは IBA の一人勝ちとなっている。MGH (US), Kashiwa (Japan), NCC (Korea), WanJie (China), Florida (US) … に納入されている。一方、日本では三菱電機と日立の二強が並ん

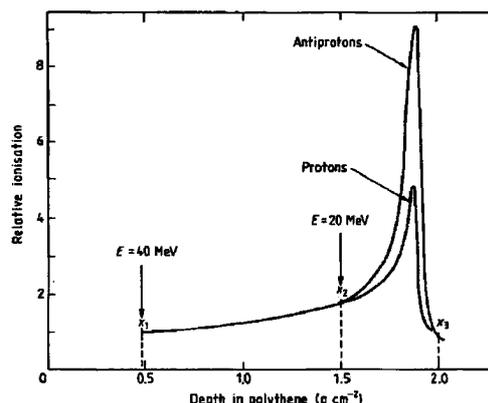


図5a Antiproton enhanced Bragg peak

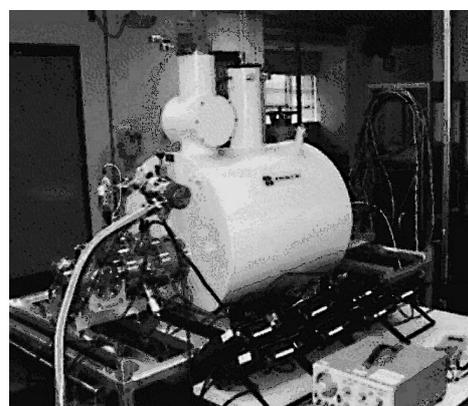


図5b Antiproton storage bottle

ている。日立は MD Anderson 病院という最強の医療パートナーをもち国外に力をいれ始めた。またロマリンドの陽子シンクロトロンは KEK にもなじみの深いそして著者もお世話になった“紙と鉛筆あるいは電卓だけで加速器を設計できる”当時 Fermilab の Lee Teng 博士が基本設計を行ったという。そのシンクロトロンの俯瞰図が図6だ。入射器がシンクロトロンの内部に配置されていて、現在からみても極めてコンパクトに作られている。加速器は運転当初磁石の出来具合等のせいでビーム強度で多少の問題があったと聞くが現在でも年間 1000 人をこえる患者を治療していてスルーットの点で世界最強と言える。この計画には当初 Fermilab の副所長で親しくしていただいた Phil Livdahl も関係していて著者には感慨深い。

また Midwest Proton Radiation Institute (MPRI) は加速器が古いタイプのサイクロトロンでありながら照射部には最先端のロボットアームを採用したという点で注目に値する。図7にあるように回転ガントリーを2台も抱えている。がん治療にはより患者に近い位置の上流側が重要であるというよい例だ。

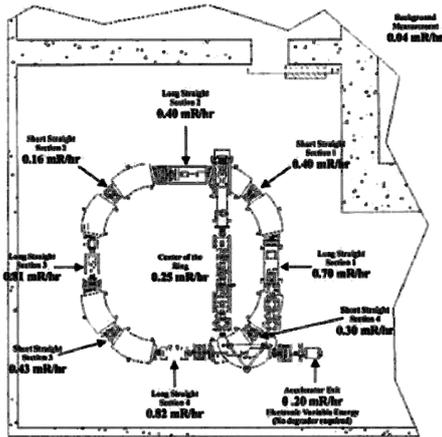


図 6 Loma Linda compact proton synchrotron

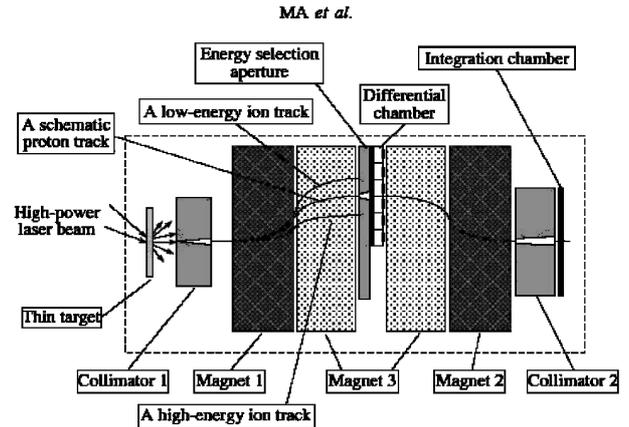


図 9 Tale top laser driven treatment system

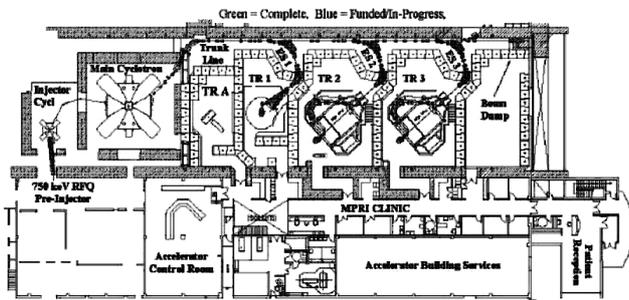


図 7 Old cyclotron with new treatment room at MPRI

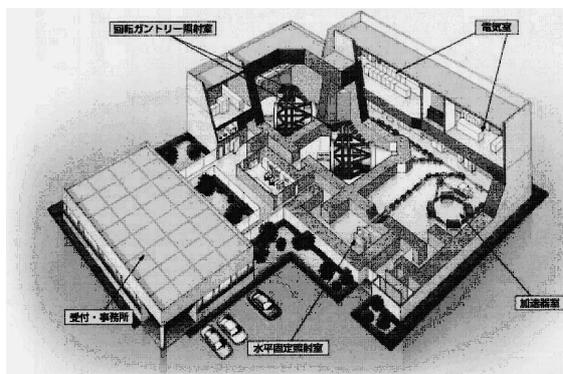


図 8 Minamitohokubyoin by Mitsubishi

図 8 は三菱電機による南東北病院の陽子シンクロトロンだ。コンパクトによくまとまっているが、新しい分を工夫しただけ厚生労働省の認可は再申請しなければならないという問題を持つという。

田島俊樹博士の関西原研らはレーザー駆動のコンパクト陽子線装置を開発しているが Fox Chase Cancer Center の Charlie Ma は数歩先を進んでいる⁹⁾。図 9 ではレーザー本体は隠れているがターゲット以降は極めてコンパクトに設計されている。治療の実用機とな

るためにはレーザーのパワーは 1 ペタワットを超える必要がある。治療側の人々が設計製作しているだけあって期待がもてそうな印象をあたえる。

同様の超小型の陽子線プロジェクトが Still River Systems 社によって開発されている¹⁰⁾。愛称は Clinatron 250。磁場強度は 7 テスラとも 10 テスラとも言われているアメリカの秘密兵器だ。治療室は一室であるが価格は一台 24 億円ともいわれているからユーザーにとっては魅力的だ。すでに複数の発注があるという。日本でも導入に気持ちが動いているところもあるそうだ。

F. 真打ち登場・重粒子線（炭素イオン）

炭素イオン治療は素晴らしいがん治療ツールだ。不幸なことにほんのひとりにぎりの医師しかその魅力を知らない。幸運なことにその効果は HIMAC で複数の有能な医師たちによって発見されたのだ。13 年間の治療患者数は 3000 人強。投じた総額はおよそ 380 億円 $X(1+20\% \times 13)$ 億円 = 1368 億円 + α 。マンパワーも半端じゃない。運転のための契約会社のスタッフだけで 80 人は超える。しかし前立腺のように患者の多くは入院の必要もない。入院している患者はみな笑顔で明るい。HIMAC には豪華な人材と金が投げられているが最初のセンターとしてはその価値は十分ある。ちなみに HIMAC は 800 MeV/u まで重粒子を加速可能であり治療に必要とされる 400 MeV/u より 2 倍高い贅沢なエネルギーで設計されているのはあまり知られていない。さらにシンクロトロンも 2 セットある豪華版だ。

国家予算の多くは無駄金という批判があるが HIMAC は放射線の効きにくいがん患者から痛みと副作用を取り除いたのだ。重粒子線でやっと真打ちが登場した。しかしどういいうわけか当初の期待と異なり最

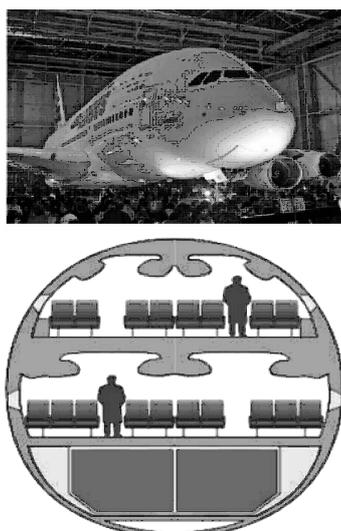


図10 Super Jumbo A380 jet with 800 passenger seats could justify well designed expensive carbon facility

近, その普及へ暗雲がたちこめてきたことも否定できない。

炭素線の魅力を復習すると：

- ）線量分布 (Bragg peak) が良い. そして横方向の散乱が少ないのでビームの飛跡がシャープ. 120 cm の深さで陽子は 10 mm 広がるが炭素イオンは 4 mm の広がりですむ.
- ）RBE (生物効果比)：ビームの入り口で Low LET (RBE=1) そして出口で high LET at the target (RBE=3)
- ）OER (酸素増感比) が 3 倍よい,
- ）細胞のセルサイクルなど気にならない,
- ）強力な殺傷力で修復不可能,
- ）フォトンや陽子が効かなくても効果有り,
- ）副作用が少ない (議論あり), 高い QOT 値 (Quality Of Treatment) & QOL (Quality Of Life),
- ）照射回数が非常に少ない (肺がん, 肝臓がんは一回の治療でよい),
- ）治療室をたくさん取れるので効率がよい.

重粒子線治療はジャンボジェットのような (図 10)：スーパージャンボ A380 には 800 人の座席がとれる. 800 人の定員のスーパージャンボ A380 が満席で片道 1 万キロメートルを平均運賃 20 万円で往復したとすると収入予測は往復 (二日間) で $1600 \text{人} \times 20 \text{万円} = 3.2 \text{億円}$ となる. 稼働率 50% なら年間約 270 億円の収入がみこめる. 一方, 重粒子線治療施設の場合は年間 3000 人の治療で年間 90 億円だ. 年間 9000 人でスーパージャンボ A380 とほぼ同額の収入とな

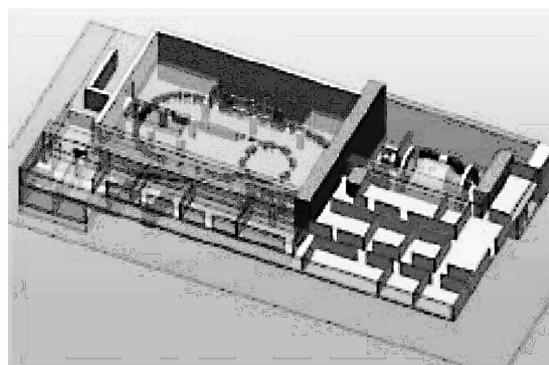


図11 CBS layout 1

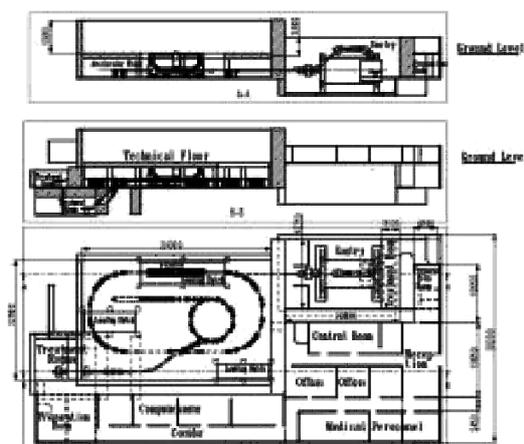


図12 CBS layout 2

る. ジャンボのガソリン代/l は我々の乗用車よりも安い位だ. 燃費はジャンボで 38 m/l というからスーパージャンボでは 20 m/l くらいであろう. 往復 2 万キロの場合の燃費は 100 円/l の場合 1 億円である. 人件費は平均一人 1500 万円/年で 80 人でも 12 億円/年. 現在ジャンボはほとんど満席だから十分採算は取れるだろう. ただし A380 の発注は多かったが開発が遅れピンチである.

ここで著者と BINP の考案した CBS について簡単に紹介する¹¹⁻¹⁴⁾ (特許申請中). CBS とは Vasily Parckhomchuck の考案したホロー電子ビームを採用し電子冷却とビーム蓄積を繰り返しながら強い強度の冷えたカーボンビームを基本とし, 超軽量の 2 軸回転ガントリーなどで構成される重粒子線がん治療の総称である^{14,15)}. 図 11 が鳥瞰図で図 12 が平面図, 側面図である. 図 13 には拡大した CBS の回転ガントリーを示す. 図右端からビームは入射し緑のパイプのなかをはいり左の球形の部屋に照射される. 特徴は回転軸が二つあることでビームラインはメカニカルに変位の曲率を持つ奇抜な構造だ. これをいわずに non copla-

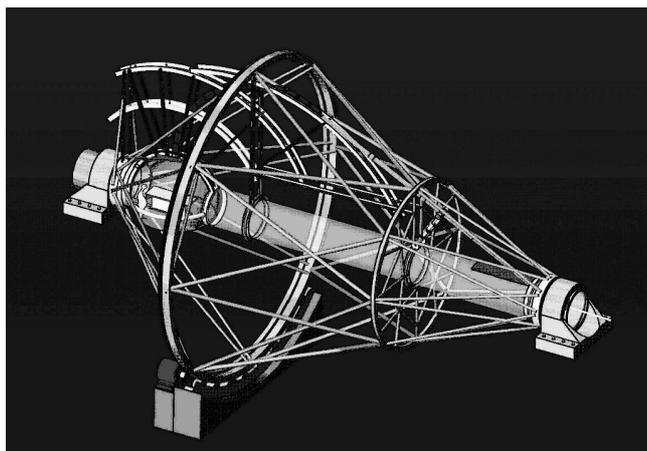


図13 Two axis low weight CBS rotating gantry

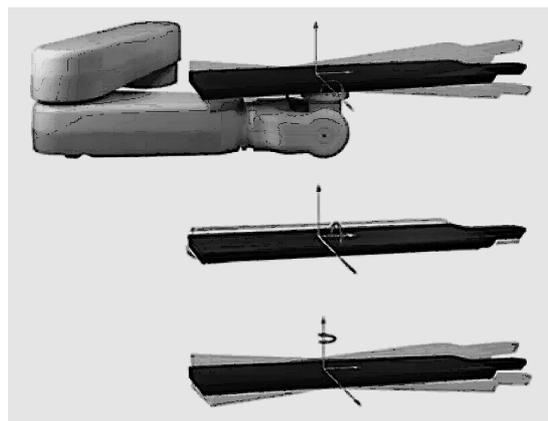


図15 Computerized robotic smart couch

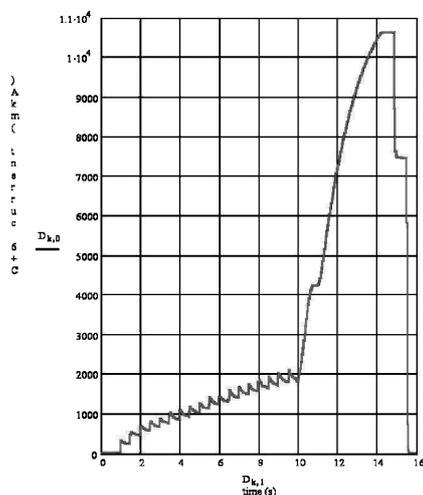


図14 The first cooling stacking of carbon beam at IMP (China) (Courtesy of V. Varkhomchuk)

nar 照射というものが可能になり照射角度の自由度が増えるだろう。

図14はCBSで考えているホロー電子ビームによる炭素ビームのCooling StackingがIMP (China)のCSRmでC6+を 10^{10} 個だけ蓄積している最新のデータだ¹²⁾。

4. ビーム照射

放医研 HIMAC では12年の経験の末、独力で年間500人の患者を治療できる所まで来た。しかしながら重粒子線治療装置が普及する鍵はその患者数にかかっており、損益分岐点は後に示すように年間千人と言われている。これを阻むボトルネックのひとつは患者の位置固定のスピードにあった。これを改良するためにさまざまな提案がなされている。



図16 Siemens's Robotic positioning system

A. スマートカウチ求む

図15は高性能ロボットカウチだ。図はAccuray社のもので同様な製品はCMS, MED-TECH and Varianなどからも入手可能という。粒子線治療施設が成功するか否かの重要なキーポイントはこのような患者位置固定装置で決まるといっても過言でない。この世界ではより上流側が重要なのだ。加速器はより下流に位置する。

図16が有名はシーメンス自慢のロボットアームシステムで床と天井の両方に設置されている。ロボットはKUKA¹⁴⁾社製だ。Accuray's Cyberknife's robotもKUKAのロボットを採用していてKUKA社は日本に支社を設置することを決定している。

シーメンスはこのロボットアームを基軸に複数の治療室の利用効率を最大限に上げる為に“ワークフロー”を自動化し3室の組み合わせで一室あたり平均10人/時間の治療を可能としている。この時間の内訳は患者の位置固定時間に4分、ビームの照射に2分、照

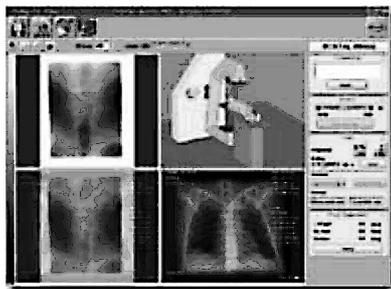


図17 MedCom の VeruSuite

射後の退出に1分である。3室を10時間/日で運転した場合で合計300人/日の治療が可能となる。ちなみに現在2カ所の日本の重粒子線施設ではいずれも60人/日である。

B. 臓器の動き

Image Guided Radiation Therapy (IGRT) は腫瘍の動きを追跡しながらの照射治療法でいま最もホットな話題の一つである。VisionRT¹⁶⁾はこのような目的のために考えられた。患者の体表のあるゾーンに等高線模様のイメージを作り、ポイント(1D)でなくゾーン(2D)をリアルタイムで追跡できる。光線だけでなくX線では体内の臓器の動きも追跡可能でMedcom社はまさにそのような画像を提供する¹⁷⁾。現在フロリダ大学陽子線治療センターなどで精力的に試験を行っている。図17はMedcom社VeriSuiteからのものでミリ以下の精度で体内にフィデューシアルマーカーと解剖学的マーカーと相対位置を明示する。

5. 放射線遮蔽技術の最先端

放射線遮蔽技術ではドイツのIngolstadtのJan Forsterがエルランゲン大学のProf.R.Muellerと二人で新技術を発信している[3]。その工法は石膏を主成分とした石膏サンドイッチ工法と名付けられている。図18&19を御覧いただきたい。図19のようにまずプレハブの薄いコンクリート壁を内と外に二重に立ち上げる。続いてその壁の間に粉末状にした石膏を叩いて詰めていく。図20の橙色の部分がこの石膏である。石膏は水和物を含んでいるので中性子を遮蔽しやすいのだ。

利用される場所は：

- 粒子線治療の放射線管理区域を仕切る建物
- アイソトープ等をあつかう施設
- 原子力発電所での遮蔽能力強化時
- チェルノブイルのような放射能の高い環境での短期間の遮蔽工事
- GSIの例のような新世代の高エネルギービームラ

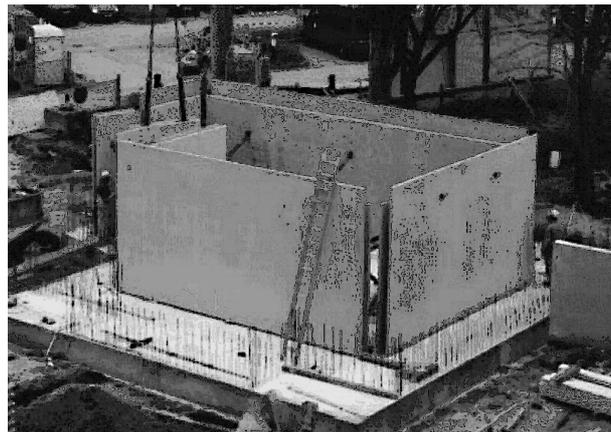


図18 Under construction by "sandwich method" using powdered gypsum

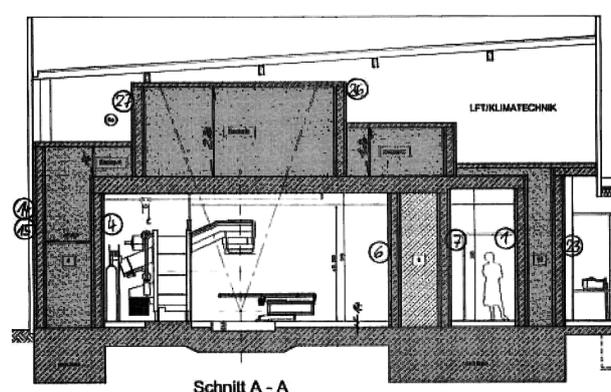


図19 Layout of a radiation shielded building.

インでの放射線遮蔽建物

サンドイッチ工法を用いると工期が短いのでドイツのように冬、零下になるような場所でも工事ができる。またコンクリートが熱でひびわれが生じることもない。そしてスクラップアンドビルドが極めて容易である。インゴルシュタットの犀(さい)“Jan Forster”の開発したこのサンドイッチ工法はライナックベースのフォトンの治療のためのバンカー(放射線遮蔽建築物)で来年度からヨーロッパにおいて急速に採用が進展する見込みである。残念ながら日本のロボットの製造会社と同様に日本のゼネコンは新技術の導入に臆病なのでいまのところ様子見の段階でその採用を見送っている。最初に手を下す事はしないのが日本の会社の特徴だ。

VI 重粒子線ガン治療一本道

A. 粒子線治療施設の候補地

粒子線治療施設の候補地は多い。国内では図20a

のようにちょっとまえまでは21カ所もの候補地が手を挙げていた。図20bにはヨーロッパの重粒子施設を赤字で示す。また日米以外ではOhio University, NIU, Nevada Cancer Institute, Stanford University, Minnesota (Mayo Clinic), Kazakhstan, ロシア Northwest Siberia, 中国上海, 中国珠海…等が設置を表明している。ただしOhioは停滞しているようだ。NIUでは最初は陽子で後に重粒子でいくという。Kazakhstanはまずは放射光が先らしい。というわけで重粒子線推進組は日本と同じくぼつぼつと離脱が始まった。

B. 粒子線施設の各地の現状

現在重粒子線施設の建設はドイツが2カ所、イタリアが1カ所、国内が1カ所建設中である。最近のビッグニュースではついにSanfranciscoの北部のツロ大学(TOURO)が導入を決定したという。ドイツはHeidelbergとMarbourgそして北部のKielである。このMarbourgもKielもいずれも民間の病院が経営者であるということが特筆すべきことである。TouroもKielもいずれも完全にダークホースだった。いずれもシーメンスメディカルソリューションが深くかわわっている。シーメンスは重イオン研究所GSIなどの研究者や治療ノウハウを入手し装置を購入した。そしてターンキーシステムをセールスポイントにしている。多くの日本の企業と異なる。また当然最先端の診断装置とシームレスに統合できているという点の特徴だ。実際、粒子線治療装置では患者により近づくほどより重要になってくると扱われているようだ。この点、物理的距離から言うと、加速器は患者から離れていて、最も離れているのがイオン源である。シーメンスは加速器の部分はデンマークのダンフイジク社にほぼ一任している。200億円ともいわれている重粒子線がん治療装置全体の価格のほんの一部(30億円程度)が加速器だとも言われている。

オーストリアは計画がスタートすると何度も言われてから久しいがいよいよ今年度こそはといわれている。オーストリアはドイツ方式とは異なりCERNの設計であるPIMMSに基づいた装置でドイツとは一線を画したかなり贅沢な施設だ。逆に限られた予算で入札が実現できるのかという問題がある。実際、ヨーロッパでは重粒子線を提供できるのはシーメンスだけで陽子線の雄、ベルギーのIBAは陽子サイクロトロンの実績しかない。このためイタリアは分割発注している。ヨーロッパはまとまっているようでそうでもない。装置の呼び名でもラテン系は同じ炭素イオンを軽イオンと読んでいるのに対してドイツ人は重イオンと呼んでいる。フランスのリヨングループも超伝導回転

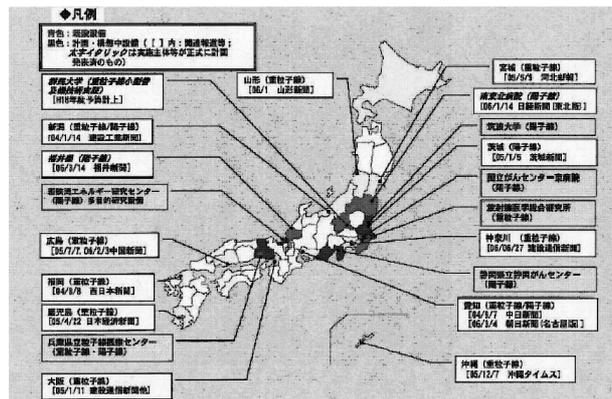


図20a Candidate carbon facilities in Japan



図20b Particle therapy facilities in Europe

ガントリーを考えているなど独自の道を進んでいるようだ。

陽子線治療施設と言えばミュンヘンのRinecker病院がACCEL社と喧嘩別れをして暗礁に乗り上げていたかと思われていたが、アメリカのVarian社がアクセルを獲得し調停にはいり動きが再開する可能性がでてきた。と思われたがこの原稿の校正段階でRinecker病院とVarian社がまた座礁に乗り上げたという。Rinecker病院の言分はスケジュールの遅れが原因だという。Rinecker病院も民間の資金で陽子線治療を始めようというもので、画期的だと思われていたのは加速器が超伝導サイクロトロンであるということよりは計画患者治療数であった。日本の多くの重粒子線治療施設計画の治療予定患者が600人/年前後であるのに比べてRinecker病院では3500人/年であった。

我が国では重粒子線がん治療施設の計画が思ったよ

うに進んでいない憂うべき状況にある。昨年12月に群馬大学の重粒子線治療センターの装置の入札が行われた。応札した会社は三菱電機と東芝であった。落札価格は80億円弱で三菱が落札した。国際的にみた場合にこれを高いと考えるか安いと考えるかは簡単ではないが国内最後の政府が補助をする重粒子線施設がスタートした。

これ以降は民間の重粒子線施設が目白押しでスタートするはずであった。民間からの準備はこれにさかのぼって着々と進められていた。民間重粒子線施設の推進を鼓舞すべく故森亮さんの創設された CCTL (炭素線がん研究所) が証券会社らと協力をして呉・広島地区や名古屋地区などに新施設をつくる活動を始めた。この証券会社は森さんの高貴な意志を引き継ぐと約束したのであったが…。名古屋には INAQ という名古屋の重粒子線計画に特化した新会社も立ち上がっていた。東北の地では個人の強力な篤志家が現れ、いつか仙台に重粒子線施設がすぐにもスタートするかと思われたが今はまた迷走していると聞く。また現在、呉も名古屋も仙台もいずれも当初の勢いはみえず陽子線施設に変更したともいわれる。陽子線施設はまだ勢いがよいが、“重粒子施設はいずこや”が現状なのか。

C. 粒子線がん治療施設の経済学

—money, money, money—

いま重粒子治療施設の新規計画は停滞期にあると言われている。複数の要因が存在するが、最大の原因は計画の採算性予測の悪さにある。

田辺氏は本誌4月号でがん医療への応用の観点から小型加速器とその社会貢献でアメリカの事情と日本の事情を比較しながら日本の加速器の医療応用には経済性が伴っていないと強く批判している。特に医療応用には投資家が魅力をもつようなものでなければいけないと主張する。アメリカの投資家が魅力を持つような計画(これをビジネスモデルと呼ぶことが多い)には極めて短期に投下資本を取り戻し、かつ、初期投資への配当が20%を超えるような計画だ。だから短期投資という観点から粒子線施設のように装置が動き出すまでに数年必要なものでは投資の検討の俎上に乗りにくい。その結果アメリカではフォトン治療が主流になり、IMRT (Intensity Modulated Radiation therapy), Cyberknife, Tomotherapy が主流となる。これらの装置は5億円前後で粒子線装置からみたら即納に近い。そして病院の利益も十分に期待できる。ただ近年、IBA の努力が実ったのか陽子線治療装置の需要が急速に立ち上がっていることも事実だ。IBA は

今年だけでも4台から5台を受注していて、陽子線治療担当の人員を2倍に増強したとか、いま陽子線治療の需要が爆発的 (exploding) とも言っている。

陽子線治療で初期投資の期間が長いこと、その額が100億円を超えてもアメリカでは経済的に引き合うようだ。この点での優等生はロマリダ大学だ。その治療の歴史は長いがしばらく前から年間1000人の患者の治療を誇っている。陽子線であるので一人の患者の治療回数は光子と変わらず35回前後の照射を行う。治療費のコストは一般には公知されずケースバイケースで患者ごとに決めているようだが平均して治療が終了するまで前立腺がんの治療の場合で700万円前後だという。盲腸の手術でも200万円必要だということからこれで驚いてはいけない。

情報筋によれば日立の作った装置である Houston の MD Anderson 陽子線治療センターでは患者一人当たりの治療費が1200万円から1800万円という。陽子線の場合、ロマリダ大学陽子線治療センターの前例があるので MD Anderson 陽子線治療センターでも FDA (Food and Drug Administration) の治療許可が取りやすいのだ。おそらく医療訴訟のために保険会社にも多額の保険金を支払っているだろうが内実は不明だ。

ところがこのような欧米資本主義と全く異なる重粒子線治療費の考え方もあるから世の中は面白い。A 先生がバンケットでイタリアの女性研究者から聞き出したところによると重粒子線の治療費でさえイタリアでは無料だというのだ。

アメリカの高エネルギー物理はどんどん先行きが暗くなっている。Fermilab は大衝突器を近々シャットダウンするというのに次期の最優先の ILC についてはいつスタートするかわからない。数年以内には無理だろう。加速器の研究者も状況は悪くなっている。そういう悪い環境のなかで Dielectric Wall Accelerator¹⁹⁾ や光子線電子ライナックに近い寸法の10 T に近い超高磁場シンクロサイクロトロンなど医療用陽子加速器などの新型加速器が提案され活気づいている。FFAG²⁰⁾ では超伝導を併用した non-scaling FFAG でビームサイズを装置の軽量化と小型化を図る重粒子用の円形加速器も検討が進んでいる。ロシアの場合のように予算がないときにより知恵が浮かぶのだ。

D. 粒子線がん治療施設の経済学

) 最近の重粒子線計画の動向

重粒子線治療施設の施設運営費に施設導入を検討しているさまざまなどで行われているが医用原子力

技術研究振興財団のシミュレーションが標準だろう¹⁸⁾。その一例は：

表1 重粒子線施設収支シミュレーション

| | | | | | |
|---------|-----|----------|------|---------|-----|
| 照射室数 | 3 | 照射回数/患者 | 11 | 治療時間/日 | 6 |
| 治療日数/年 | 250 | 照射回数/年 | 9000 | 治療患者数/年 | 804 |
| スタッフ数 | 57 | | | 収入(億円) | 25 |
| 土地(億円) | 10 | 施設(億円) | 108 | 運営費(億円) | 19 |
| 借入額(億円) | 119 | 返済/年(億円) | 7.3 | 支出/年 | 26 |

シミュレーションの前提条件はひとまず脇において、治療患者数が800人の場合は収入が25億円に対して支出は26億円でほぼバランスしているとも見えるが、この数字は3年強の建設期間が終わり直ちに立ち上げ時の3年間強かけて患者数を増やしたあとで定常状態になったときのものである。建設期間の必要経費や立ち上げ時の3年間強の赤字は含まれていない。さらにこの前提では建設終了後直ちに厚生労働書の許可がおりてすぐに、最初の1年間で300人の有料治療が可能であるとしている。この条件があてはまるのはおそらく群馬大学とまったく同じ仕様の装置だけであろう。逆にいうと民間企業があらたな改良を加えた装置では何年間かの赤字準備運転期間をさらに加えないといけない。これでは民間への普及は不可能になるので同報告書では最大値として1000人/年の患者数でのケースになれば有料治療開始後12年目にはじめて累積赤字が黒字に転換可能としている。厚生労働書の許可が直ちにおりるとした場合に建設期間から15年で黒字になるという。

知っておかなければいけないことは年間1000人の治療はロマリンド陽子線治療センターで何年も前から実績をつくっている。そのロマリンド陽子線治療センターにおいてはOPTIVUS社(ロマリンドの運転会社)が開発した“Conforma3000”においては3倍の患者数を実現すべく新システムの導入が始まろうとしている。このような状況でフォトン(X線)との複合治療であるとしても陽子線の照射回数はおよそ35回と重粒子線の3倍以上であることを考えれば重粒子線で年間1000人でも目標が低すぎるのではないかと多い。呉・広島や名古屋で検討された計画では証券会社が出資するかと思われたがビジネスモデルでの患者数の設定で見通しのある数字に達しなかったため撤退したといわれている。重粒子線治療の市場は有力な投資会社が撤退して負のスパイラル効果で一

時の興奮は冷めてしまったかのようだ。さらに敦賀や指宿では陽子線推進グループが“強引な論理で”から陽子線建設に踏み切らせたという。

では解決案はないか？ いずこにボトルネックがあるのか？

) 重粒子線施設を実現するには：

(a) 自由市場経済を取り入れる

先の田邊氏の主張を最初に読み聞きしたときには日本にアメリカの悪しき手法をもちこむとんでもないアメリカかぶれの主張だと感じた。そもそもアメリカはますます貧富の格差が広がり医療費を支払えない人々がどんどん増えている。貧困層でなくて、アメリカの良い大学を卒業して民間会社でアメリカ経済の実務を担っている層はどうかという住宅ローンなど大きな負債を抱えながら生活をしている。アメリカ社会なので会社からの一時的な解雇の危険はかなり高く解雇されれば医療費の支払いの問題は切実だ。しかし、成功すれば望めば最高の医療を受けることは可能で選択の自由はある。

重粒子線治療は患者がその治療を国内では望んでも希望通りにはいかないケースがほとんどだ。放医研では年間600人強しか治療を受けられない。兵庫県粒子線治療センターにいたってはさらに少ない。治療競争率は明らかにされていないが巷の噂によれば20倍ともいう。ということは望んでもほとんどが治療を受けられないのが現実だということだ。

副作用のない、痛みのもととなわない治療は希望者のすべてに適用すべきなのに装置が普及しない。なぜか？ 薬事法の規制が第一の原因だ。厚生労働省の許可に過度の規制がかかっているために有料治療を始めるのが困難な状況なのだ。しかし、何事も強く望めば困難を解決する方法は常に存在するはずだ。

(b) 位置設定・位置固定の効率をあげる

患者に治療ビームを照射する時間は1分～2分間程度であるのに患者の位置設定・固定に30分もかかる。治療室が34部屋あって最大限にタイムシェアリングしても平均10分かかって、装置の出射可能なビームはほとんど使われない状態だ！ この問題を解決すべくSiemens Medical solutionsやOPTIVUSはKUKA社のロボットアームを導入しイメージングの装置を統合して、位置設定・固定の無駄を省いた高速システムを導入している。残念ながらロボット王国といわれる我が国のロボットを製造する会社はいずれも医療の応用に拒否反応を示している。

彼らは患者一人あたり平均10分以内で位置設定・固定が可能としていて、いずれのシステムも来年には

稼働しているだろう。この患者一人当たりに必要な想定平均治療時間はシーメンスの新システムと同じである。最新の3DイメージングシステムのVisionRTやMedcom社の3Dイメージング技術との組み合わせは特に有用である。これらの方法とは別に患者の動きを減少させる全く異なるアプローチも考えられ現在検討中である。

(c) 挑戦的スループットの設定・年間9000人

SiemensやOPTIVUSのように患者の位置設定・固定時間を従来の1/3にできれば同じビーム量でも3倍のスループットを実現できる。また重粒子は、もともと低フラクシオン数なので陽子線の治療患者数の3倍も可能である。原理的には装置の能力と言う点からのみ言えばスタッフの数を9倍増やすことで9000人/年の患者数という極めて挑戦的スループットを掲げることも不可能ではないのだ。陽子線のRinecker病院が最初年間3500人という数字をかかげたときには皆耳を疑った。不幸にも彼らは別の原因で建設が中断してしまったが、目標は掲げれば可能となる。9000人/年も不可能ではないはずだ。そうなれば一般への普及はもちろん治療費を大幅に下げること可能となる。私たちが目指すのは可能な限り多くのガン患者を重粒子で治療できるかということなのだ。

(d) イノベーション技術の積極的導入？

陽子線加速器ではすでにインダクションライナックのDWA¹⁹⁾超強磁場の超伝導シンクロサイクロトロンと小型化への挑戦が始まっている。これらは超小型陽子加速器1台に治療室1室という病院設置で数十億円の廉価版の治療装置でアメリカで好まれている。また高磁場を使った強収束nonscalingFFAGの重粒子加速器も似たコンセプトだ。重粒子線シンクロトロンの小型化にはパルス超伝導磁石の改良を待つ必要があるが潜在的には9000人/年の患者治療能力を持つので必ずしも小型である必要はない。重要なのは副作用と痛みに苦しむ多くのガン患者に重粒子線治療を選択する自由を与えることだ。このような重粒子線普及をめざして“最先端治療（がん・ガン・癌）と重粒子線治療”などの情報は役にたつことを願う²¹⁾。

謝辞

最初に感謝したいのは大強度電子冷却装置シンクロトロンCBSで指導的役割を続けている友のブドカー核物理研究所Vasily Parckhomchuckと放射線遮蔽の新工法の発明者Jan Forsterで彼らとの議論はいつもエネルギーの源となってきた。本稿の見解は重粒子線施設の研究に邁進している同僚や周囲の研究者とは大

きく隔たる。しかし大義は治療を求める多数の癌患者に答える所にある。Lee Smolinが近著“The TROUBLES with PHYSICS (Penguin (UK), Feb. 2007)”で述べているが、必要な分野のイノベーションを求めには民間の方法を取り入れる必要がある。すなわち主流に属さない一部のリスクな研究者にも研究の機会を与えることだという。この点で放医研の平尾泰男前所長および同僚には甚大なる感謝を申しあげたい。高信頼性・低コスト・究極のスループットの重粒子線がん治療施設の夢を現在進行形で見続けさせてくれている熊田由美には無限の感謝をしたい。

参考文献

- 1) <http://www accuray.com/Products/Cyberknife/index.aspx>
- 2) <http://www.tomotherapy.com/company/company.htm>
- 3) <http://www.forster-bau.de/>, http://www.forster-systemverbau.de/Berichte_ueber_uns/BWI/forster-e-neu.pdf
- 4) <http://www-bd.fnal.gov/ntf/>
- 5) <http://www.neutrontherapy.niu.edu/neutrontherapy/>
- 6) http://www.symmetrymagazine.org/pdfs/200504/Symmetry_Apr05.pdf, pp22-27.
- 7) <http://www.linac.com/CompanyProfile.html>
<http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2006/PR15.06E.html>
- 8) M. H. Holzscheiter et al., Radiotherapy and Oncology Volume 81, Issue 3, December 2006, Pages 233-242
- 9) http://www.engr.psu.edu/antimatter/Papers/pbar_med.pdf
C.-Ma. Et al., ISSN 1054-660X, Laser Physics, 2006, Vol. 16, No. 4, pp. 1-8.
- 10) <http://www.stillriversystems.com/>
- 11) <http://conferences.fnal.gov/cool05/>
- 12) Vasily V. Parkhomchuk, private communication, and for ingenious hollow beam electron cooling scheme, see http://conferences.fnal.gov/cool05/Presentations/Thursday/R01_Parkhomchuk.pdf of <http://conferences.fnal.gov/cool05/Presentation.htm>
- 13) M. Kumada et al., PAC 05, Knoxville, 1108
- 14) E.B.Levichev et al., RUPAC 06, Novosibirsk
- 15) <http://www.kuka.com/en/>
- 16) <http://www.visionrt.com/>
- 17) <http://www.medcom-online.de/>
- 18) 普及型粒子線がん治療施設の概念調査, 平成17年3月, 医用原子力技術研究振興財団
- 19) G. Caopraso et al., PAC07, Albuquerque
- 20) D. Trbojevic et al., <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e06/PAPERS/WEPCH180.PDF>
- 21) <http://ameblo.jp/feynman/>, “最先端治療（がん・ガン・癌）と重粒子線治療”