

公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団

# 20周年を迎えて

創立20周年記念誌



ASSOCIATION FOR NUCLEAR TECHNOLOGY IN MEDICINE



## 20周年を迎えて 創立20周年記念誌

---

I	創立20周年を迎えて	理事長 垣添 忠生	1
II	祝辞 - 創立20周年に寄せて	評議員会会長 井上 俊彦	3
III	医用原子力の今、そして未来		
	1. ここまで来た粒子線治療	副理事長 辻井 博彦	4
	2. これからの中性子捕捉療法 - 原子炉から加速器へ -	フェロー 河内 清光	6
	3. 放射線治療をささえる - 正確な線量を処方された部位へ -	常務理事 遠藤 真広	8
IV	財団の歩み		
	1. 沿革		12
	2. 設立時の資料等		14



## 創立20周年を迎えて

・垣添 忠生

公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団 理事長

医用原子力技術研究振興財団は、平成8年に創立され、本年3月に創立20周年を迎えました。人間で言うところの成人式を迎えて大人になったということになりまじょうか。

当財団は原子炉や加速器等から発生する粒子線等による先端のがん治療、各種放射線による疾病の診断ならびに治療等、医用原子力技術の研究を推進し、普及を図ることを目的として活動してまいりました。

当財団が歩んでまいりました20年の道程を顧みますと、設立当初は順風満帆で世の中の期待を背負って力強く歩みを進めてまいりました。ところが2011年3月11日に起きた東日本大震災と東京電力福島第一原発の事故以来、大きな困難に遭遇してきました。しかし専門性の高い人材・能力を礎に着実に経験と実績を積み重ねてきたこと、そして何より皆様のお力添えを得られたことによりまして、現在では、医用原子力技術の普及啓発、人材育成、および放射線治療に係る機器の品質管理の支援等の各種の広範な事業を全国規模で展開し、国民の健康と福祉の向上に些かなりとも貢献できているものと自負しております。ここで改めまして、これまでに賜りました各方面の関係者の皆様の温かいご理解とご支援に心から感謝の意を表したいと存じます。以下、当財団の代表的ないくつかの活動を順次ご紹介申し上げます。

### 1. 粒子線がん治療

当財団事業の主要な柱を形成しており、新たに粒子線がん治療に取り組もうとする施設に対して、その建設計画から運用開始および維持・発展に至る各プロセスで、様々な支援活動に注力してまいりました。特に人材育成においては、文部科学省の委託事業として、施設の中核となる専門的知識・技術をもった人材の養成実績を積み上げ、当該施設・関係機関とも緊密な協力関係を築き、当財団本来の重要な役割を果たしました。

当財団は、これらの経験、実績をもとに、後継的な自主事業である粒子線がん治療に関する人材育成セミナーを立ち上げ、各施設での治療および運営に係る従事者(医師、医学物理士、診療放射線技師等)はじめ関連

産業等で所要の役割を担う多くの人材を育成してまいりました。

中でも重粒子線がん治療は、国内のみならず、日本発の独自技術として先導的役割で世界を牽引している技術です。その優れた医療技術を世界に普及させることは先進国としての責務であると同時に、日本発の新しい医療産業の創生として国力の向上に大きく資するものと申せまじょう。その成功には財務計画、保守サービスを含む機器・装置および施設の建設ならびに運用の一体的推進体制の構築とともに、その施設の運用に必要な人材育成が重要な鍵を握っています。

その一つとして国際重粒子線がん治療研修コース(ITCCIR)は、海外の粒子線がん治療施設の従事者等を対象に、国内の関係機関と当財団との共同主催で年1回、6日間の日程で実施してまいりました。平成24年度に開始して以降年々参加者が増加しており、最近では10数カ国・地域から毎回50名を超える参加を得ています。本事業は、わが国が世界有数の粒子線大国として国際貢献を果たしていく上で大変意義深く、重要な事業といえます。

### 2. ホウ素中性子捕捉療法(BNCT)

当財団は国内唯一のBNCT普及推進の公益団体であり、設立当初より研究開発および技術の進展を支援してまいりました。BNCTは、これまでに臨床研究が続けられ、その有効性の評価が次第に高まってまいりました。しかし実用化に向けてさらに歩を進めていくためには、腫瘍細胞に選択的に高濃度で集積する新しいホウ素化合物の開発や、原子炉に代わる中性子発生装置である、病院設置型の加速器の開発が鋭意進められているところです。

現在、既にBNCTの取り組みを進めている研究拠点に加え、新たにいくつかの施設が導入を検討し、プロジェクトが構想、あるいは計画されています。当財団は、これら国内の関係機関が相互に進捗状況を把握し、専門家間の情報交換ならびにわが国の適正なBNCTの配備計画などを大局的な立場から進めることが重要と考え活動してまいります。

### 3. 放射線治療の精度向上および品質管理

当財団はそのための第三者機関として線量校正事業を実施しており、5学会・団体の監理のもとに国内で唯一の組織としてその重要な任務を担っています。治療用線量計校正事業は、平成16年4月より開始し、照射線量単位による校正（空中校正）を実施し、さらに平成24年度から世界的な標準である水吸収線量単位による校正（水中校正）による校正体系の提供へ移行するなど、技術の向上を進めてきています。線量校正実施施設は、既に年間3,000件を超え、全国848施設（約97.5%）を占めるに至っております。当財団の本事業は独立行政法人製品技術評価基盤機構（NITE）によって「計量法校正事業者認定登録制度」（JCSS）の登録事業者認定を受けており、常に高品質の校正サービスを適正な価格で提供できるよう努めています。

放射線治療装置の加速器本体の出力線量測定事業は、平成19年11月より開始いたしました。がん診療連携拠点病院および一般病院で使用する放射線機器において、放射線治療装置からの出力線量を第三者として正確に評価するため、ガラス素子線量計による郵送調査を行い、測定報告書を発行しています。本事業の開始によって、わが国が国際的な標準である外部評価システムをもつ国として認められることになりました。現在では年間150件を超える依頼を受けています。医療施設の品質管理への意識の向上にともない、今後も実施施設の増加が期待されることから、運用方法の改善や測定機材の整備に努め、世の中の要請に機動的に対応を図っております。

### 4. 公開講演会「人にやさしいがんの放射線治療」

平成16年から年1回各地を巡回して無料開催してきました。放射線利用技術が診断・治療等のさまざまな医療現場で活用され、役立っていることを、広くわかりやすく一般の方々に紹介し、理解いただくことを目的とするものです。患者さん自らががんをよく知り、過度に恐れず積極的に向き合う環境づくりを進め、また一般の人々を含めた地域社会ひいては国民全体の医療福祉の向上に繋がることを目指しています。最近の傾向として、粒子線がん治療施設の計画・建設が進められている地域において、住民の関心の高い最新の詳しい情報を提供し、理解促進に貢献し、そのプロジェクトが地域によく受け入れられるように環境整備に努めています。

### 5. 放射線医学オープンスクール

将来にわたって医用原子力技術を担い継承していく人材育成事業として平成20年度より開始しました。医学

部のみならず医療系および理工学系等の幅広い分野の大学生および大学院生を対象に、大学では学ぶ機会の少ない放射線医学の面白さ・素晴らしさに触れる機会を提供することを目的としています。各地の関係機関の協力により、講義・施設見学を中心に、特別講演や懇談会も含め1泊2日のプログラムで実施しています。毎回30～40名の学生の参加があり、「放射線治療に魅力を感じた」「放射線治療医になりたいと思った」「放射線のイメージが危険なだけのものから、プラスのイメージが変わった」等参加者アンケートの良好な調査結果が得られています。本事業は、放射線医学分野において多くの優秀な人材、特に若手の人材確保につながることは言うまでもありません。それに加えて将来の放射線医学および医療全体のダイナミックな発展に大いに貢献することになると考えています。

### 6. さらなる飛躍へ

ここまで当財団事業の主要なものをご紹介しましたが、この他にも、広報誌「医用原子力だより」、パンフレット、メールマガジン等の出版物等を発行し、医用原子力技術の普及啓発を進めてまいりました。また、機器・設計・建設等各分野の企業の技術者の参画による「粒子線がん治療等に関する研究会」を設け、専門情報の共有・交換の場の提供を通じ、産業の育成にも貢献しております。さらに、調査分析および技術支援事業を、国、研究機関、地方自治体等より受託し、数多くの実績を積み上げてまいりました。

さて、わが国は、世界最速で超高齢社会に移行しつつあり、がん、認知症など高齢者に多い疾病の激増が見込まれております。医用原子力技術は、これまでに成人病などの各種疾病の診断およびがんの治療等において大きな貢献を果たしてまいりました。今後も超高齢社会において、人類の持続的で健全な繁栄に寄与し得る技術であり、宗教や民族、時代を超えて多くの人々から受け容れられ、ますます重要性を増して発展していくことが期待されます。

私どもの財団は、医用原子力技術の普及・推進という大きな使命と活動理念を掲げ、非営利・公益的組織の立場でその存在感を一層高め、私どもに求められている重責を果たしていく所存です。

冒頭、当財団がやっと成人を迎えたと申し上げましたが、私どもがその責務を果たしていくためには、まだまだ未熟な部分もあり、引き続き皆様の温かいご理解とご支援が不可欠と考えております。どうぞ変らぬご理解、ご支援をよろしくお願い申し上げます。



## 祝辞「創立20周年に寄せて」

・井上 俊彦

公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団 評議員会会長

医用分野における原子力技術は魅力あふれる課題であります。その研究振興を目指して、研究を支援することは決して縁の下の力持ちと言った黒子的な性格ではなく、常に時代の要請を先取りしながら、世の中に広く知らせる使命を持つものです。むしろ、芽を出しかけている事業に・そして人に力強い支援を送るものとして、20年にわたり国内の関連事業に本財団は全力投球で貢献してきました。したがって、そこには文字通り「山あり谷あり」の20年でありました。

5年前、自然災害が原因で、原子力関連事業に逆風が起きました。残念ながら、その対応が後手に回ってきたことは否めない事実です。しかし38億年と言われる生命の歴史にとって考えてみれば、想像を絶する自然現象による壊滅的打撃を受けて、絶滅したかにも見える中で、より環境に適応した生物が新たに出現してきたのが地球上で繰り広げられてきたドラマであります。地球誕生以来わずか46億年の間に1度きりでなく、大きな変化が数回も起こっています。それが時間軸を持った私たちの目で見える進化として、理解されています。ところで、伝統は常に壊すより護るほうがやさしいと言われます。ところがほぼ25年前に、Scrap & Buildと言う掛け声が大学で大流行しました。実は、大阪大学に新設された私のポストはまさにそのようにして準備されたものでした。不完全ではありましたが、国内で初めての放射線治療学講座でした。敢えて、旧来のものを護ることを放棄して、その廃材を利用して、新しいものに挑戦するスタンスを取ったのです。そうして誕生したものがその後の時間経過と共に淘汰され、真に必要なものが次の基幹となって残っていきました。その段階になると、新しい環境に順応したものは追い風を受けて、展開します。中には進歩と言えないものもありますから、敢えて展開とします。変わりつつあることを、真っ只中に居る者がどのように把握するかあるいは理解するか、実は、それは難しい作業であります。理由はその時点で未だ時間的要素による

評価が定まらないからです。

私は医用原子力技術研究振興財団の中で、研究助成選考委員会という分野のお仕事を京都大学名誉教授の阿部委員長のもとでさせていただきました。放射線医学を大きく分けて、診断・治療・核医学の3分野毎のすぐれた若手の研究者を支援しようとするものです。毎年、多数の応募者の中から、各委員の真剣な事前査読と討論で年5件を選び、理事会に答申しました。ホウ素中性子捕捉療法法の審査において、時に、故安先生から鋭い指摘がなされることがありました。安先生を始めとする財団関係者がこの研究の展開に熱い支援を送り続けてこられたことがわかるものでした。冒頭に申しました時代の要請を先取りして支援する、まさにそのことでした。最後の研究助成者の中から選ばれた優れた研究者に、安先生記念賞が贈られました。研究助成事業のよい記念になりました。毎年の授賞に際して、亡くなられた森理事長の的を射た温かい激励の言葉は若手研究者にとって、この上ない喜びであったと思います。助成の1年後に研究発表をしていただき、その成果を聞かせていただくことは選考委員にとって楽しい時間であり、会場を埋め尽くす聴衆にとってその研究分野の進歩に驚嘆する時間でした。

数年前、財団の財政危機で事業見直しが行われ、この研究助成事業が失われましたことは、関係者にとって残念なことでありました。近い将来、助成事業の復活が待たれるものです。矢張り、人を育て・研究を進める支援事業こそが、私には本財団の性格を何よりもよく示しているものだと思うからであります。私たちは過去をふりかえるだけでなく、未来への期待を持つことが出来ます。ここに本財団が次の10年の航海に乗り出すにあたって、評議員会会長としての責務を果たすべく努力することをお誓いすると共に、私のささやかな希望をお伝えし、創立20周年の祝辞とさせていただきます。





## ここまで来た粒子線治療

・辻井 博彦

公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団 副理事長  
 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 客員研究員

エックス線は1895年末に発見されたが、その翌年にはがん治療に用いられるようになった。それ以来、放射線治療は装置・照射技術の改良が加えられ、20世紀後半には定位照射法や強度変調照射法といった革新的な照射法が開発された。これは陽子線や重粒子線治療などの粒子線治療も同様で、1970年代を境に一気に技術開発が進み、治療成績の改善とともに適応疾患の拡大に大きく寄与するようになった。なかでもわが国は粒子線治療大国であり、治療実績や施設数において世界の先頭を走っている。

### 1. 粒子線治療の歴史

陽子線や重粒子線などの荷電粒子が物質内に入射すると、まっすぐ進みながら一定深度で止まり、その直前で線量ピークを作る。この現象は1903年に発見され、発見者に因んでブラッグピークと呼ばれる。一方、E.O. ローレンスは、1930年にサイクロトロンを発明し、これにより粒子線が人工的に作れるようになった。こうして得られた粒子線（イオン線）のがん治療への応用を提唱したのがR. ウイルソンである。これを受けて、1954年に世界初の陽子線治療が開始され、1975年にはネオン線を用いた重粒子線治療が開始された（図1）。

陽子線治療は、その後、旧ソ連や、スウェーデン、および米国 MGH でも行われるようになったが、本格的な実施はCTが発明された1973年以降である。わが国では、1979年に放医研で始まったが、エネルギーが低かったため対象は主に脈絡膜メラノーマであった。1983年に開始し

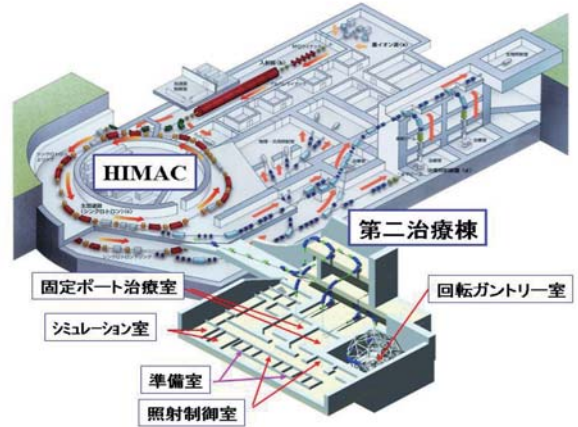


図2 HIMAC 棟の全景。本棟（治療室3）ではブロードビーム照射法、第2治療棟ではスキャンニング照射が行われ、回転ガントリーの開発も進行中である。

た筑波大学では、世界で初めて深在性がんを対象とするようになった。

重粒子線治療は、1975年に米国のバークレー研究所で始められ、一部の疾患で良好な成績が得られたが、財政難を理由に打ち切られた。これによって替わるようにして、1993年、放射線医学総合研究所（放医研）で医療用としては世界初の重粒子加速装置（HIMAC）が完成（図2）、翌94年6月から炭素線を用いた重粒子線治療が開始された。2011年には新治療研究棟が完成、スキャンニング照射が始まった。現在、回転ガントリーを開発中である。

### 2. 粒子線治療の特徴

陽子線や重粒子線治療の魅力は、なんとといっても体内で高線量域（ブラッグピーク）を形成し、病巣の選択的照射が可能なことである（図3）。重粒子線はさらに、陽子より12倍重い炭素核を加速して得られるので、DNAに対する作用は主に2重鎖切断である（図4）。その結果、ピーク部の生物効果（細胞致死作用）は陽子線やX線よりも2～3倍高く、がん病巣内の酸素濃度や細胞周期による放射線感受性の違いが小さい。従って、エックス線に抵抗性を示すがんであっても効果が期待出来ることになる。重粒子線はまた、治療期間を大幅に短縮することが可能である。これは施設の有効活用という面で非常に大きな特徴で、他の治療法より多くの患者を治療できることを意味している。

1895	独・レントゲンがエックス線を発見	
1896	エックス線によるがん治療開始	
1903	英国・W.H.ブラッグがブラッグ曲線発見	W.H. Bragg
1930	米国・E.ローレンスがサイクロトロンの基礎理論を発表	
1946	米国・R.ウイルソンが粒子線のがん治療への応用を提唱	R. Wilson
1955	米国・バークレー研究所が陽子線による臨床研究を開始	E. Lawrence
1961	米国・マサチューセッツ総合病院で陽子線治療を開始	
1973	英国・ハウンスフィールドがエックス線CTを発明	
1974	米国・バイ中間子治療を開始	
1975	米国・バークレー研究所が重イオン線臨床研究を開始	
1979	(独)放医研が陽子線による臨床研究を開始	
1983	筑波大学/KEKが陽子線による臨床研究を開始	
1990	ロマリダ大学が世界初の陽子線治療専用施設を完成	G. Hounsfield
1994	放医研が炭素線による臨床研究を開始	
1997	ドイツGSIが炭素線による臨床研究を開始	
2002	兵庫県が炭素線による臨床研究を開始	

図1 陽子線と重粒子線治療の歴史

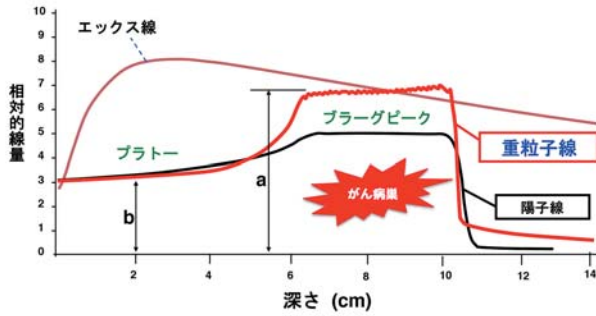
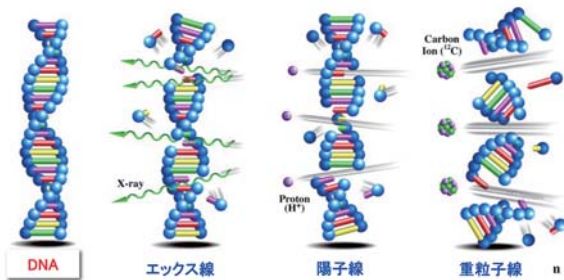


図3 陽子線と重粒子線は、体内で高線量域(ブラグピーク)を形成するので、がん病巣への線量集中が容易。重粒子線はさらに、ピーク部分の生物作用が高いので、RBEのピーク対プラトー比(a/b)が大きく、がん病巣に対して高い細胞致死効果が期待できる。



(Courtesy of NIRS: Nature 508, 133-138 (03 April 2014))

図4 放射線によるDNA傷害の違い。同じ量の放射線を照射しても、線種により細胞致死効果が違う。重粒子線は主に2重鎖切断である。

### 3. 世界の粒子線治療施設

世界で陽子線と重粒子線治療は70カ所近くで実施されているが(表1)、他にも多くの施設が建設中あるいは計画中である。日本の粒子線治療は、陽子線と重粒子線治療ともに、放医研でそれぞれ1979年と1994年に始められた。現在、わが国で15施設(陽子線10、重粒子線4、陽子/重粒子1)が稼働中である(表2)。

表1 世界で稼働中の粒子線治療施設(2016年)

国	陽子線	重粒子線	陽子線 +重粒子線	合計				
				施設数	患者数			
北・中部 欧州	英国	1		1	16 23.5%			
	フランス	2		2				
	ドイツ	4		2				
	イタリア	2	1	3				
	スウェーデン	2		2				
	スイス	1		1				
オーストリア		1	1					
東欧	チェコ	1		1	2 2.9%			
	ポーランド	1		1				
ロシア	3		3	3 4.4%				
アフリカ	南アフリカ	1		1	1 1.5%			
アジア	日本	10	4	1	15			
	中国	1	2	1	4			
	韓国	2		2	2			
	台湾	1		1	1			
北米	カナダ	1		1	24 35.4%			
	米国	23		23				
				<b>56</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>68</b>	<b>100%</b>

表2 わが国の粒子線治療施設

粒子線	都道府県	施設名称
陽子線	1 北海道	北海道大学病院 陽子線治療センター
	2 福島	南東北がん陽子線治療センター
	3 茨城	筑波大学 陽子線医学利用研究センター
	4 千葉	国立がん研究センター東病院
	5 長野	相澤病院陽子線治療センター
	6 静岡	静岡県立静岡がんセンター
	7 愛知	名古屋陽子線治療センター
	8 福井	福井県立病院陽子線がん治療センター
	9 岡山	岡山大学・津山中央病院共同運用 がん陽子線治療センター
	10 鹿児島	メディボリスがん粒子線治療研究センター
重粒子線	1 千葉	放射線医学総合研究所重粒子医学センター
	2 兵庫	兵庫県立粒子線医療センター(重粒子線+陽子線)
	3 群馬	群馬大学重粒子線医学研究センター
	4 九州	九州国際重粒子線がん治療センター
	5 神奈川	神奈川県立がんセンター重粒子線治療センター

日本の重粒子線治療は世界で最も盛んで、放医研、兵庫県立粒子線医療センター、群馬大学重粒子線医学研究センター、佐賀県の九州国際重粒子線がん治療センター、および神奈川県がんセンター(iROCK)で行われている。神奈川の照射法は放医研と同様、スキニング照射法が採用されている。現在、山形大学と大阪でも重粒子線治療施設を建設中である。

### 4. 重粒子線治療の臨床成績

放医研の重粒子線治療においては、1994年6月以来、各種のがんについて臨床試験が行われ(図5、図6)、2003年には、厚生労働省より「固形がんに対する重粒子線治療」の名称で高度先進医療(今の先進医療)の承認が得られた。これまでの放医研における重粒子線治療患者数は9,700人以上で、延べ治療件数は1万人以上である。

重粒子線治療は、放射線抵抗性で難治がんの代表である骨・軟部腫瘍に有効とされ、2016年4月に保険適応になった。さらに、頭頸部腫瘍、肺・縦隔腫瘍、消化管腫瘍、肝胆膵腫瘍、泌尿器腫瘍、乳腺・婦人科腫瘍、および脈絡膜悪性黒色腫等が良い適応になっている。なお、腺がんや頭頸部悪性黒色腫は遠隔転移が多い疾患であるため、

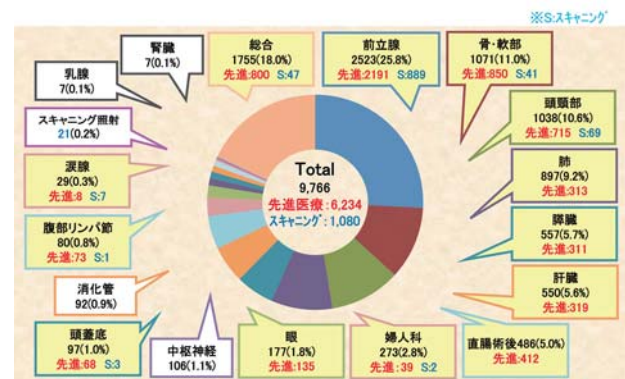


図5 放医研における重粒子線治療の登録患者数(1994年6月~2016年2月23日)





図6 放医研における治療患者数の推移

重粒子線と抗がん剤の併用療法が有効である。

重粒子線治療は短期間の治療が得意である。現在、放医研の患者1人当りの根治照射は平均12回(3週間)で、これは一般の放射線治療の半分以下である。I期肺がんや肝がんに対してはそれぞれ1、2回、膵がんが12回、頭頸部や骨軟部が16回で、前立腺がんはすべて12回(3週間)をスキヤニング照射法で行っている。

28年度診療報酬改定において、陽子線治療は「限局性の小児腫瘍」に対して、重粒子線治療は「手術非適応の

骨軟部腫瘍」に対して有効性が示されたとして、全額の保険適用が認められるようになった。その他の疾患は、先進医療AまたはBとして実施されることになった。施設運営のため施設基準の遵守が求められるようになった。

## 5. まとめ

重粒子線治療は、これまで世界で1万5千人以上の患者が治療され、他の放射線治療(陽子線や高精度エックス線治療)では難治性のがんに対しても有効であることが示されている。このため、重粒子線治療の導入を目指す施設が増加しているが、世界で最も臨床経験が豊富なわが国からの技術支援および研究交流の要望が高い。この傾向は、陽子線治療しか行っていない米国においても同様である。米国のNCIは、重粒子線治療を推進するための研究助成、ならびに比較試験に対して研究助成を行っている。

今後、陽子線と重粒子線治療ともに、多くの疾患についての保険収載が望まれるが、同時に、装置建設コストと医療費の低減、新技術の開発、人材育成等が課題である。



## これからの中性子捕捉療法 - 原子炉から加速器へ -

・河内 清光

公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団 フェロー

中性子捕捉療法は、当財団が発足当時から最重要課題として取り組んできたテーマの1つです。原子炉を使う医療ということで、医用原子力技術振興財団では直接かわりの深いテーマです。しかし、平成23年に起きた東日本大震災の津波の影響を受けた福島第一原子力発電所の事故は、全ての原子炉を停止させる結果となり、当然、原子炉を使用していた中性子捕捉療法も中止せざるを得なくなりました。しかし、新しい技術開発が進み、病院設置型の加速器による中性子捕捉療法が注目を浴びています。

中性子捕捉療法は1936年に新しいがん治療法として紹介され、1951年からホウ素-10 ( $^{10}\text{B}$ ) を中性子捕獲物質として使う BNCT が米国ブルックヘブン国立研究所の原子炉 BGRR、後に BMRR で、またマサチューセッツ工科大学の MITR でも脳腫瘍の治療が行われましたが、結

果が思わしくなく1961年以降中止されておりました。

この中断していた BNCT を、米国で学んだ畠中坦先生が1968年日本で再開しました。

新たなホウ素化合物を使用すると同時に、熱中性子の透過力不足を補うため、開頭手術を併用するプロトコルで悪性脳腫瘍の治療を再開し、国内のみならず、諸外国においても BNCT の臨床研究が再検討されるようになりました。さらに、脳腫瘍のみならずメラノーマや他の悪性腫瘍に対する臨床研究も行われました。

一方、技術的にも熱中性子の透過力不足を補うため、京都大学原子炉実験所(KUR)や日本原子力研究開発機構(JRR-4)では、熱外中性子による治療も行えるように原子炉の照射装置を改装し、BNCTの臨床研究が行われていましたが、東日本大震災に伴い原子炉は停止してし



まいました。それまでの BNCT は、治療装置はもちろんホウ素薬剤を含めた安全性や有効性を確かめる研究段階にあり、原子炉はその役割を十分果たしてきました。しかし、原子炉による BNCT の普及には限界のあることも議論されていました。

病院設置型の BNCT システム開発の観点から、加速器で発生させた中性子を BNCT に使用するプロジェクトが始まりました。特に、東日本大震災後、日本ではいくつかの加速器 BNCT システム開発プロジェクトが進行しています。

第一は、京都大学原子炉実験所、住友重機械工業株式会社およびステラファーマ株式会社は、原子炉停止以前から共同で技術開発を進めてきたもので、2012年10月から脳腫瘍の治療を目的とした治験を開始しています。装置はサイクロトロンで、陽子を30MeVに加速し、ベリリウムのターゲットに当てて発生した中性子を、中性子捕捉療法に適したエネルギーに減速して、濃縮したホウ素10を基にして開発された BNCT 用ホウ素薬剤と合わせて、治験を開始しました。この治験は再発悪性脳腫瘍の患者を対象とした第1相（加速器 BNCT の安全性及び忍容性を検討することを目的とした）臨床試験で、2014年からは再発頭頸部腫瘍に対しても実施され、既に、この第1相臨床試験はいずれも終了し、現在、再発悪性脳腫瘍に対する第2相（最適線量を評価する目的の）臨床試験が行われています。

また、同一装置は福島県の復興と医療機器産業振興に寄与するとして、福島県から財政支援を受けて一般財団法人脳神経疾患研究所が運営する総合南東北病院に導入され、現在、京大原子炉実験所とともに、再発悪性脳腫瘍に対する第2相臨床試験を行っています。さらに、同一システムは、大阪医科大学にも導入されることになっています。

第二は、株式会社 CICS (Cancer Intelligence Care Systems) が開発し普及に取り組んでいるもので、独立行政法人国立がん研究センターと2010年12月に共同研究契約を締結し、同中央病院に建設した治療棟に設置されました。同社は、株式会社日立製作所が100%出資している米国の AccSys Technology Inc. と提携し、システ

ムを構成する加速器を供給し、加速器 BNCT 全体の製品化に向けた技術協力を行うと伝えられています。加速器は、AccSys が BNCT 用として特別に開発設計した高出力400MHzのRF電源とRFQ (Radio Frequency Quadrupoles) ライナックとを組み合わせ、陽子を2.5MeVに加速、20mAの電流を供給し、CICSの用意した固形蒸着再生リチウムターゲットを使って中性子を発生させています。また、同装置は、東京の江戸川病院にも導入されることになっています。

第三は、いばらき中性子医療研究センター内に設置されるもので、NEDOの資金を得て筑波大学、高エネルギー加速器研究機構、日本原子力研究開発機構、北海道大学などが連携して開発し、三菱重工が制作した線形加速器でRFQとDTL (Drift Tube linac) からなり、陽子を8MeVに加速し、10mA (ビームパワー80kW) をベリリウムターゲットに当てて中性子を発生するシステムで、現在、中性子発生試験が行われています。

名古屋大学のシステムは、加速器はIBA社のDynamitronで、加速エネルギーが1.9～2.8MeVで可変であり、ビーム電流は15mA以上となっています。固体の小型リチウムターゲットで、Li及び生成RIを金属フォイルで閉じ込め、高熱負荷を水冷チャンネルで除去する構想になっています。既に、加速器とビームラインが設置され、ビーム調整が行われています。

大阪大学は住友商事と三菱重工メカトロシステムズの協力を得て、加速器 BNCT 装置の開発を進めています。静電加速器と核融合技術を取り入れた液体リチウムターゲットで構成されるシステムで、2013年からはパーミンガム大学でプロトタイプの実証試験を実施し、2014年からは本体設計が開始され、既に減速体系やLiループの設計は終了しています。

いずれも、加速器の種類や中性子発生法に特徴があり、装置の安全性や信頼性、物理的線量測定結果の評価した上で、臨床試験を実施する段階です。これからの中性子捕捉療法は、恐らく病院設置型の加速器 BNCT が普及するとともに、腫瘍細胞にのみ集積するようなホウ素薬剤の開発研究が進み、理想的な悪性腫瘍治療の一手段として展開されるものと期待しています。



## 放射線治療をささえる - 正確な線量を処方された部位へ

・遠藤 真広

公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団 常務理事

### 1. はじめに

近年、人口の高齢化などに伴い、がん罹患する人の数が著しく増加しています。最近の国立がん研究センターの発表によると2016年にがん罹患する人は101万人であり、初めて100万人を超えると予測されています。がんの治療法の主なものには「手術療法」「放射線療法」「化学(薬物)療法」があり、がんの3大治療法とされています。このうち、放射線療法は、技術の進歩による適応の拡大や疾病構造の変化(胃がんなどの消化器のがんの割合が減り、肺がんや前立腺がんが増える)により、次第に治療の中での比重を大きくしてきました。2010年の統計では、放射線治療を受ける患者は全体の25%を超えています。この比率は増えることはあっても、少なくとも当面は減ることはありませんから、2016年には実に25万人を超える患者が放射線治療を受けることとなります。放射線治療を正確に行い、期待される治療成績をあげるためには、放射線腫瘍医、放射線治療専門技師、医学物理士、放射線治療専門の認定看護師など専門家のたゆまぬ努力が必要なことは言うまでもありませんが、医用原子力技術研究振興財団(以下、「財団」と略記します)も物理・技術的品質管理の面で微力とはいえその一翼を担っています。

### 2. 放射線治療の線量管理

放射線治療の原理は、腫瘍の部位に必要な線量の放射線を照射し、正常の部位に照射される線量をできるだけ少なくすることです。粒子線治療や強度変調放射線治療(IMRT)は、加速器やコンピュータ技術の発展を応用して、この原理を実現したものです。ここで、腫瘍の部位に照射される放射線の線量は、経験から決められた処方線量より少ないことはもちろん、大きくても治療成績を悪くします。経験上、腫瘍へ照射する線量の誤差は処方線量の±5%以内におさめることが要求されています。米国医学物理学会(AAPM)では、この目標を達成するため1984年に出版したレポート13で、図1に示すように患者内の線量計算の誤差を4.2%以内とし、ファントム(人体を模擬する模型、この場合は水槽)内の出力線量の誤差を2.5%以内とするガイドラインを提案しました。

腫瘍へ照射する線量は、CT画像を用いて計算できま

す。これは、CT画像がX線吸収の大きさの分布を表していることを利用するものです。体の中は筋肉や脂肪、骨、肺、空気層など物理的な性質の異なる組織が混在し、また治療に用いる放射線(通常は電子リニアックという加速器で発生させるX線)の体内での挙動も複雑であり、提案当時は計算誤差を4.2%以内に留めるのは容易ではありませんでした。しかし、計算手法の改善やコンピュータ技術の発展により、腫瘍へ照射する線量は非常に精度よく計算できるようになり、現在はおおむねこの目標は達成されています。

一方、ファントム内の出力線量の誤差を2.5%以内に留めるという目標は、線量の測定誤差をその範囲に収めるということですから、達成が比較的容易に思えます。しかし、次節で述べるように線量の計測-特に絶対線量の計測は、複雑なプロセスとそれに伴う誤差要因が存在し、それほど容易ではありません。

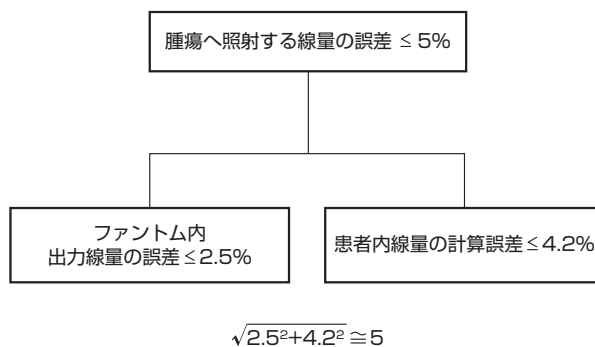


図1 線量誤差の配分(AAPM: Report 13)

### 3. 線量の計測

放射線の線量の定義は、いくつかあります。福島原発事故以来、一般にも知られるようになったミリシーベルト(もしくはその1000倍のシーベルト)は、放射線防護で用いられる実効線量の単位であり、人体への影響を考慮していて、純粋に物理的な量ではありません。

一方、放射線治療で用いられる線量は、吸収線量といわれ、純粋の物理量です。吸収線量(以下「線量」と表記)の単位はグレイ(Gy)であり、1Gyとは1kgの物質



に1Jのエネルギーを与える放射線の量として定義されます。与えられたエネルギーは熱に変わって、放射線が照射された物質の温度を上昇させるので、原理的には温度変化から線量が測定できるように思えます。しかし、放射線治療で通常1回に照射される2Gyの放射線を水に照射しても、その温度上昇は、わずか0.48ミリ℃ ( $4.8 \times 10^{-4}$ ℃)であり、この程度の温度変化を1%程度の誤差で測定するのは、実験室の特別な装置であればできるかもしれませんが、放射線治療の現場でルーチンに行うことは不可能です。

放射線治療では図2に示すような電離箱を用いた線量計に放射線を照射し、その際に流れる微弱な電流を計測することにより線量を測定します。図2の電離箱は指頭型と呼ばれるものであり、「箱」形ではなく、先の丸い円筒形をしています。その形が指先に似ているため、指頭型という名称がついています。直径は1cm程度かそれ以下であり、中は空気が満たされています。外側と中心の電極の間に数百ボルトの電圧を加えて、放射線により電離されるイオンと電子を集めます。放射線を照射したとき流れる電流（正しくはその積算値）と線量は比例するので、それを用いて線量を求めることができます。

電離箱線量計により相対的には十分な精度で線量が測定できるのですが、絶対値を求める際には2つの大きな問題があります。①線量計は精度良く製作しても全く同じにならず感度がばらつきます。②放射線治療にはX線、粒子線などいくつかの線種が使用され、同じ線種でもいくつかのエネルギーのものが使用されます。線種とエネルギーを合わせたものを線質といいます。線質が異なると同じ電離箱を用いても、電流積算値と線量の比例関係は変化します。放射線治療に用いられるX線では、エネルギーにより比例係数は5%程度変化します。

後者の線質の変化を補正する（実はそれだけではなくその他の条件による測定値の差異も補正する）系統的方法をプロトコルといいます。治療用線量の測定プロトコルを確立することは、放射線治療の物理にとって、きわめて重要な問題であり、日本医学物理学会は、その前身の日本医学放射線学会物理部会のあるところから40年以上にわたってさまざまな研究を行い、その成果を現場のマニュアルとしても使用できるプロトコルガイドラインとして出版し、10年程度毎に改訂しています。

#### 4. 線量計の校正

3の①で述べた線量計の感度のばらつきについては、同じ線量を照射したときの読み値（電流積算値）の相違をもとに補正します。これを線量計の校正といいます。ここで、線量計の校正は、線量を世界的に共通にするためのシステムの中で行われます。線量も重さ（単位はkg）や長さ（単位はm）と同じように世界的に共通であることが要請され、図3に示すようなシステムによりそれが保証されています。図の国際度量衡局（BIPM）はフランスに本部があり、重さの基準（キログラム原器）を保有していることで有名です。

線量に関しては、世界各国の一次線量標準機関（日本では産業技術総合研究所（産総研）は、BIPMの放射線照射施設（放射線場）において自国のプロトコルと基準線量計で線量を測定して、他国の一次標準機関の測定する線量と相互に比較します。この相互比較では、日本を含む世界の主要国の標準機関の測定する線量の偏差は、おおむね1%以内におさまっています。日本国内では、一次線量標準機関である産総研から次のような仕組みにより、線量の標準が供給されます。産総研は放射線場を保有していて、それを用いて二次線量標準機関である医

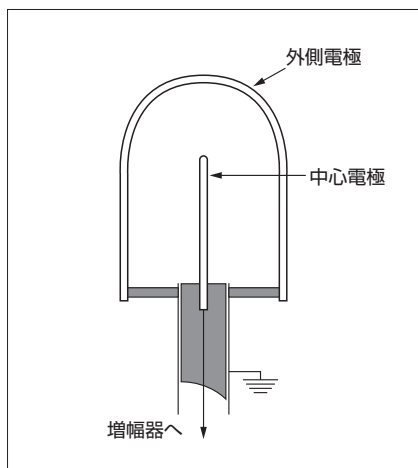


図2 電離箱の構造

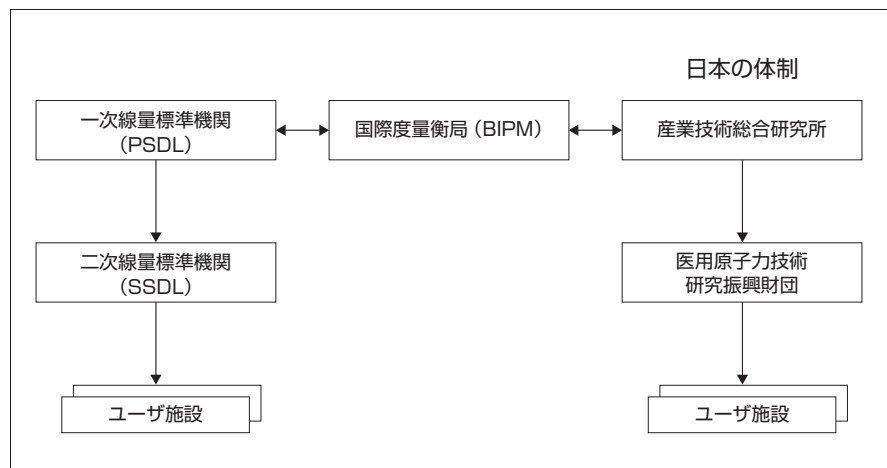


図3 線量を世界的に共通にするシステム

用原子力技術研究振興財団の線量計を校正し、財団は放射線医学総合研究所（放医研）にある放射線場を用いて一般ユーザ（病院など治療施設）の線量計を校正します。このような仕組みで校正された線量計と学会指定のプロトコルを用いることによりファントム内で測定する線量の誤差は、国内の施設間では1.5%以内、国際的にみても2%より少なくできるとされています。

治療線量を上記のような仕組みにより国際および国内標準と結びつけることを線量のトレーサビリティと言います。その重要性はコバルト60照射装置や電子リニアックを用いた治療が始まった1960年代には十分に認識されており、1971年に日本医学放射線学会により組織的な標準供給が始まりました。学会による標準供給は上記のプロトコルガイドラインの発行・改訂と線量計の校正から構成されておりました。このうち、線量計の校正は、放射線治療件数の増加とともに順調に増加しておりましたが、学術団体である学会の活動としてはなじまない面もあり、次第に継続が困難となりました。このような状況から、医用原子力技術研究振興財団が事業の移管を受け、日本医学放射線学会、日本医学物理学会、日本放射線腫瘍学会などの関連学会、放医研、産総研の専門家の指導のもと平成16年度（2004年度）より線量計の校正事業を行っています。また、平成20年11月に製品評価技術基盤機構（NITE）から国際基準に基づく審査を受け、「計量法校正事業者登録制度」（JCSS）登録認定を受け、校正業者としての能力を認定されております。図4は財団へ移管後の校正件数の年次推移を示しています。校正件数は移管後、順調に増加し、また、ほとんど全ての治療施設が校正を行っております。

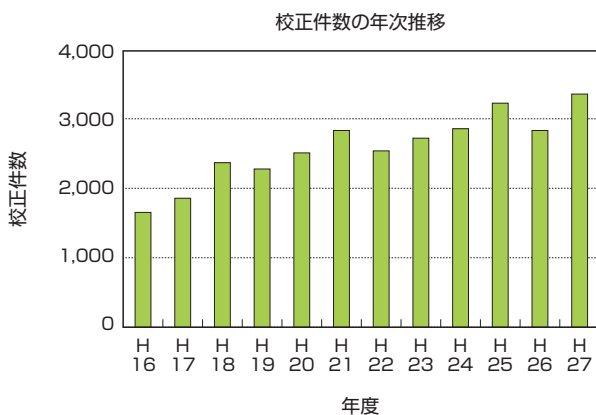


図4 線量計校正件数の年次推移（財団移管後）

## 5. 出力線量の測定

以上のように日本の放射線治療施設のほとんどが、財団の校正と学会のプロトコルにより担保されるトレーサビリティシステムの枠内にあります。したがって、正しく作業を行えば、2%以内の誤差でファントムへ線量を照射できるはずですが、しかし、治療施設が孤立して、プロトコルを実行する場合、思わぬ誤りが発生する可能性は皆無とはいえません。このような誤りを早期に見出すためには、それぞれの施設がプロトコルに従い出力した線量を第三者が客観的に評価する作業が必要になります。

国立がん研究センターの班研究や放医研での研究により、ガラス線量計を固体ファントムに挿入して照射する評価法が開発されました。ここで、ガラス線量計は銀を加えたリン酸塩ガラス製の直径1.5mm、長さ10mm程度の円筒状素子であり、放射線照射の影響を蓄積できます。ガラス線量計は放射線照射後、紫外線を照射すると照射された線量に比例して発光します。ガラス線量計の測定精度は2%程度であり、電離箱線量計のように高精度の測定はできませんが、照射後、任意の時間に線量が測定できることから、郵送に適しています。郵送法では、固体ファントムにガラス線量計を挿入して、ユーザに送り、一定の線量を照射したものを返送してもらいます。そしてガラス線量計を読み取り、指定した線量との差を評価します。この方法により5%以上の差がないかを検証しますが、これは5%以上の差があるということは、思わぬ誤りによる系統的な誤差が発生して、治療成績に影響を与える可能性があるからです。

財団では、ガラス線量計に関する上記の研究成果に基づき、平成19年度（2007年度）より郵送法による出力線量測定を行っています。実施施設は、当初は年間50施設前後でしたが、次第に増加してきました。特に平成26年1月に厚生労働省より、がん診療連携拠点病院の指定要件として第三者による評価を受けることが指針に示されましたが、それにともない、平成26-27年度においては、年間150施設程度と大幅に増加しています。ガラス線量計への照射条件の設定誤りなどのため、5%を超える誤差が発生した場合がありますが、多くは誤りを修正することにより5%以内に収まりました。しかし、ごく一部の施設に対しては財団として原因を把握できませんでしたが、再測定により5%以内に収まり、施設側に何らかの修正対応があった可能性も否定できません。



## 6. 線量分布の検証

第4節と第5節で述べましたように、これまでの放射線治療における財団の活動は、投与線量が正確であることを保証する一連の作業のいくつかのパートを分担するものでした。この節では、今後、どのような方面に活動を広げていく計画かを簡単に述べます。

第2節の冒頭で述べたように、放射線治療の原理は、腫瘍の部位に必要な線量の放射線を照射し、正常の部位に照射される線量をできるだけ少なくすることです。最近、盛んに行われるようになった強度変調放射線治療(IMRT)は、電子リニアックと付属装置を精密に制御し、多方向からの照射強度を変化させる(変調する)ことにより、腫瘍へ線量を集中し、正常部位の線量を少なくする照射法です。

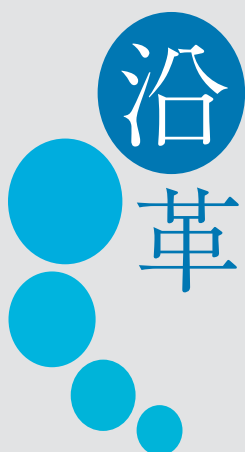
IMRTを実施するには、治療装置を制御するための非常に多くのパラメータが必要ですが、そのほとんど全てが治療計画の結果として出力されます。治療計画を行う治療計画装置は、ユーザにはほとんどブラックボックスであり、何らかの誤りがあっても分かりにくいシステムとなっています。もちろん、IMRTを安全に行うため、学会は品質管理のガイドラインを出版し、またそれを実施するためのマニュアルも出版されています。しかし、治療施設が孤立して、IMRTを実施する場合、思わぬ誤りが入る可能性が皆無ではないことは、出力線量の場合と同様です。

現在、国立がん研究センターを中心として、多くの学

会が協力する形でがん治療の多施設臨床研究が行われていますが、IMRTについてもいくつかの臨床研究が実施されています。そこでは、参加施設の物理・技術的な治療品質を担保するためファントムを郵送し、IMRT治療をファントムに対して行い、線量分布と投与線量が計画通りかを検証する作業が行われています。このファントムは、出力線量の測定用のファントムに比べて複雑であり、実際の患者を模擬しています。また、ガラス線量計だけではなく、線量分布を測定するため、放射線に感光するフィルムが挿入されています。財団としては、近々と想定されているこの方法の実用化を待って、IMRTの第三者検証の業務に取り組むことを計画しています。

## 7. おわりに

医用原子力技術研究振興財団は、日本医学放射線学会から線量計の校正事業の移管を受け、さらに出力線量の測定に事業を拡大し、放射線治療の物理・技術的品質管理の一翼を担ってきました。また、今後はIMRTの第三者検証や、この稿では述べませんでしたが、粒子線治療の品質管理への関与も計画しています。財団がこのような事業を展開できるのも、関連学会並びに放医研、産総研、国立がん研究センター等の関係者のご指導とご協力の賜物であります。今後とも、ご指導、ご協力を賜ることを切に願うものです。また、物理・技術的品質管理の面で放射線治療をささえる財団の活動を多くの方にご理解賜るようお願いする次第です。



## 公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団 沿革

### 設立までの準備

設立にあたって、平成7年11月29日に設立発起人会が開催された。設立発起人代表に向坊隆氏（故人、当時（社）日本原子力産業会議会長）が選出され、また、森亘氏（故人、当時日本医学会会長）を理事長とする理事15名、監事2名の役員候補者が選出されるとともに財団設立に必要な寄附行為等が定められた。その後、財団の設立準備が整い、平成8年2月29日に設立許可申請書を科学技術庁ならびに厚生省に提出し、同年3月26日付で両省庁から設立許可を得、本財団の設立の運びとなった。

**平成8年3月26日** 内閣総理大臣、厚生大臣、科学技術庁長官より公益法人設立許可を得て設立  
虎ノ門5森ビルに事務所を置く  
理事長に森 亘氏が就任

**平成8年4月** 国からの委託事業等による調査分析事業を開始

**平成8年4月** 関係研究機関等の技術支援事業を開始

**平成8年9月** 医用原子力技術に関する研究助成事業を開始

**平成10年10月** ホームページ開設

**平成12年1月** 虎ノ門第2升本ビルへ事務所移転

**平成13年1月** 粒子線がん治療等に関する施設研究会設置、第1回開催

**平成16年4月** 計測校正事業（治療用線量計校正事業）を開始

**平成16年11月** 広報誌「医用原子力だより」創刊

**平成16年12月** 「財団講演会」第1回を開催

**平成18年3月** 創立10周年を迎える（記念祝賀会、記念誌「10年のあゆみ」製作）

**平成19年8月** 文部科学省委託事業「粒子線がん治療に係る人材育成プログラム」開始

**平成19年8月** 千葉事業所の開設

**平成19年11月** 治療用照射装置の出力線量測定事業を開始





写真左が向坊隆氏、右が森亘氏



設立発起人会(平成7年11月29日)

平成20年8月 放射線医学見学ツアー（放射線医学オープンスクールに改称）の第1回を開催

平成20年11月 JCSS（計量法校正事業者登録制度）登録事業者の認定を取得

平成21年1月 JCSS 校正を開始

平成21年4月 「線量校正センター」開設（旧「千葉事業所」）

平成22年6月 賛助会員向けメールマガジン「医用原子力メールマガジン」創刊

平成24年4月 公益法人制度改革にともない公益財団法人へ移行

平成24年6月 理事長に平尾 泰男 氏が就任

平成24年7月 国際重粒子線がん治療研修コース（ITCCIR）の第1回を開催

平成24年12月 事業展望および財務に係る委員会報告を受け事業運営方針決定  
事業の選択と集中により事業内容を見直し

平成25年2月 日本橋小伝馬町ニッケイビルへ事務所移転

平成26年6月 理事長に垣添 忠生 氏が就任

平成26年8月 粒子線がん治療に関する人材育成セミナーを開始

平成28年3月 創立20周年を迎える（9月記念講演会・祝賀会、記念誌「20周年を迎えて」製作）

現在に至る

## 設立時の資料等

### 財団法人医用原子力技術研究振興財団設立趣意書

近年日本など先進国において死亡原因の首位となっている各種のがんの治療については、早期発見法の進歩と相まって、多くの薬剤や手術、放射線照射等の進歩により、かなりの治療成果を見るにいたっている。しかしながら、なお一部のものについては、治療成績はこの半世紀の間、顕著に進展しているとはいえない。

各国で政府や各種支援組織に支えられて、多くの研究者が、がん研究に真剣な努力をつづけるなかで、原子力の技術開発から生まれた原子炉や加速器で発生させた粒子線等の各種放射線を、先端技術を利用して高精度に患部に照射・吸収させることにより正常組織への影響を抑えつつ、がん組織を破壊する新しい治療法が開発され、すでに一部、臨床に応用されている。

しかしながらこれらの新しい治療法については、症例数の不足もあって、まだ健康保険の適用は期待できず、また粒子線発生装置あるいは病床など、それぞれ専門分野・所属組織も多岐にわたるため、関係者の熱意ある協力にかかわらず、治療研究の実施や技術の普及にあたっては、多くの障害や困難を抱えている。

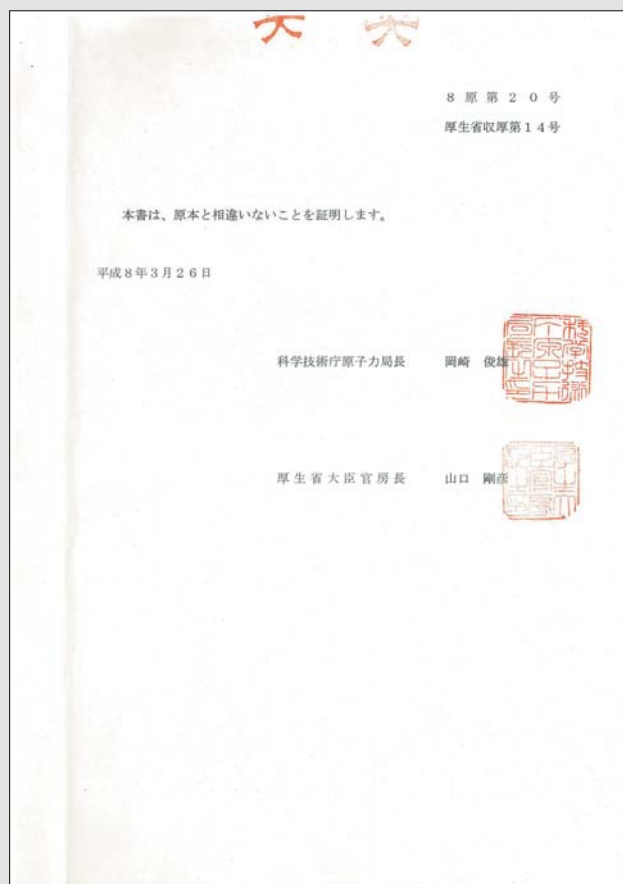
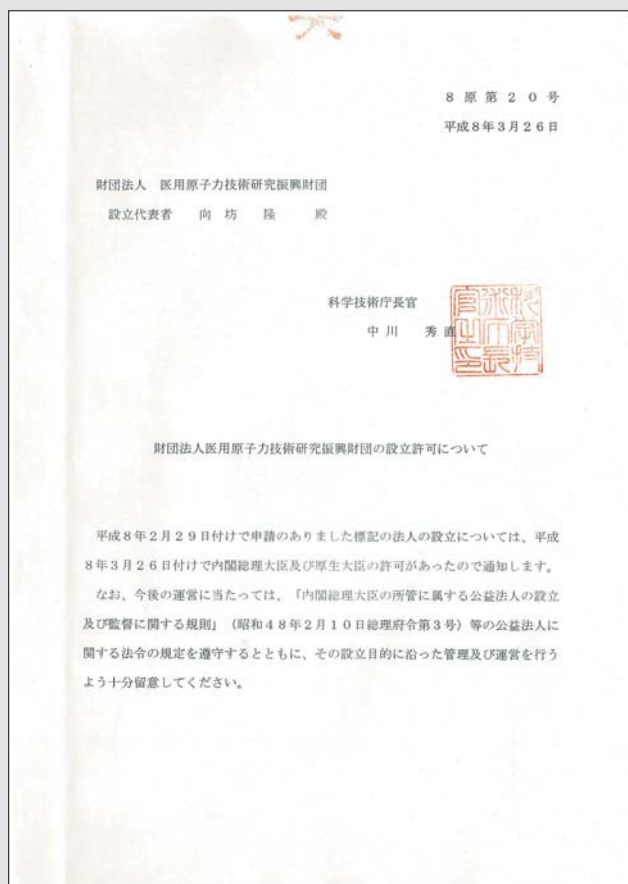
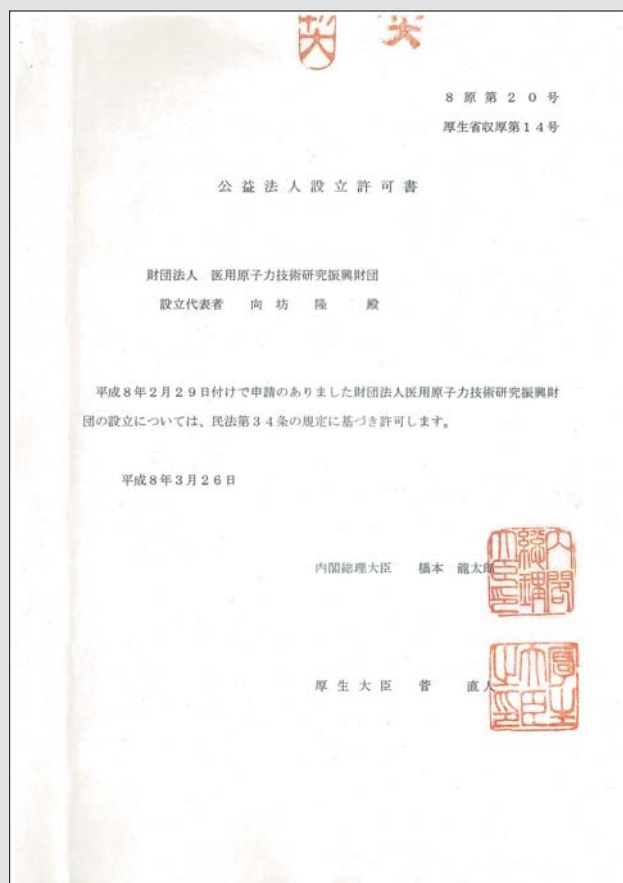
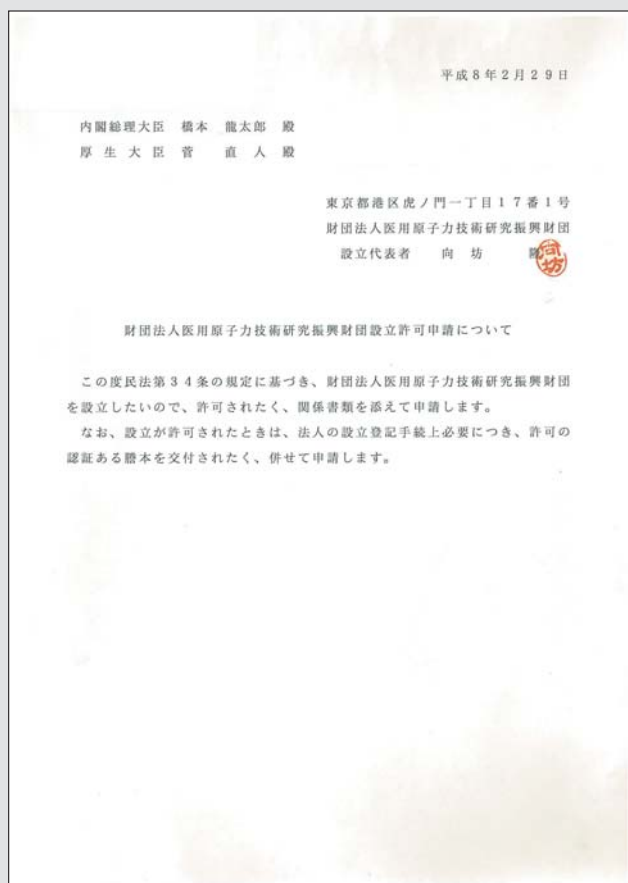
一方また、短寿命核種や放射線を用いた各種疾病の診断にも原子力技術は大きな貢献を果たしており、これらの手法についても今後一層の改善と発展が期待されている。

このような状況に鑑み、原子力の技術を用いて行われる、粒子線等によるがんを初めとする各種疾病の診断・治療に関して、その利用研究の推進と国民への啓蒙、関係組織間の連絡調整、また治療実施のための調査・研究等を行うためここに本財団を設立し、もって科学技術の振興と人類の福祉向上に資することとしたい。

本財団の設立・運営につき朝野各位の格別のご理解と協力をお願いする次第である。

以 上

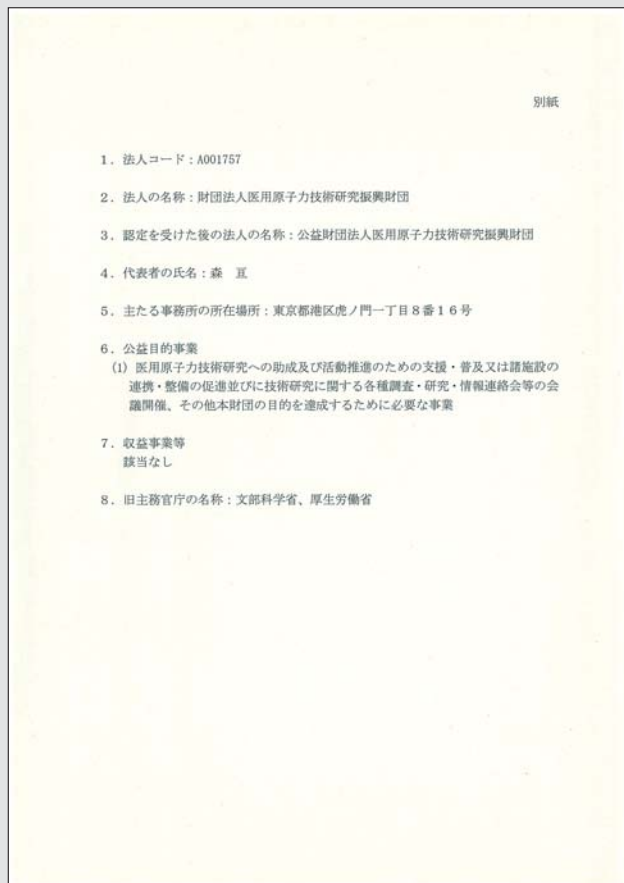
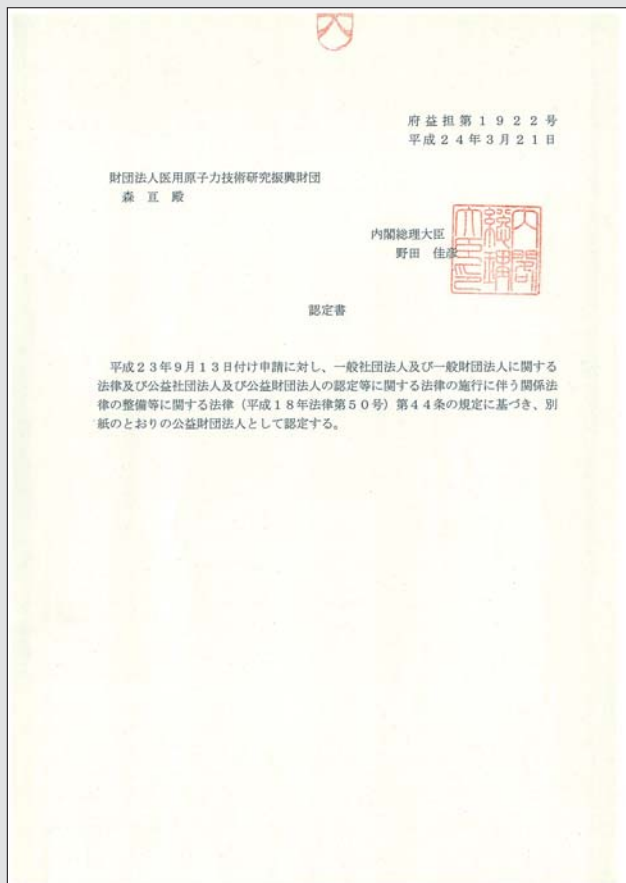






## 創立10周年記念祝賀会

平成18年2月8日 東京都港区にて





# 20周年を迎えて

創立20周年記念誌

---

発行日 2016年9月

公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団

〒103-0001 東京都中央区日本橋小伝馬町7-16

ニッケイビル5F

TEL (03)5645-2230 FAX (03)3660-0200

---





公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団  
ASSOCIATION FOR NUCLEAR TECHNOLOGY IN MEDICINE