

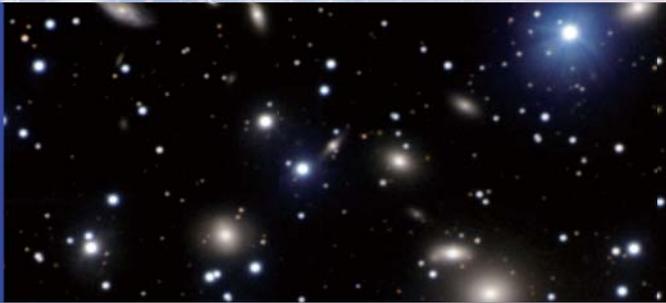
Radiological Sciences

# 放射線科学

2009.08

Vol.52

第52巻 第8号



Abell 426  
NAYUTA+MINT

Filter (Exp) :  
B (300sec), V (100sec), R (100sec)  
Date : 18 November 2006  
Observer : Ryo Iizuka (NHAO)

Nishi-Harima  
Astronomical  
Observatory

Radiological  
Sciences

## 最近の成果

「重粒子(炭素)線が生成する活性酸素を可視化する」

「光学望遠鏡で探す地球外文明」

ISSN 0441-2540

## Contents

04

### 最近の成果

#### 「重粒子(炭素)線が生成する 活性酸素を可視化する」

Visualizing Reactive Oxygen Species Caused by Heavy-Ion (Carbon) Beam  
-MRIによる高解像度レドックスイメージングの応用-

重粒子医科学センター 粒子線生物研究グループ  
松本 謙一郎

- 永田 桂<sup>1),2)</sup>、山本 晴彦<sup>2)</sup>、遠藤 和豊<sup>3)</sup>、安西 和紀<sup>1)</sup>、青木 伊知男<sup>4)</sup>  
 1) 重粒子医科学センター 粒子線生物研究グループ  
 2) 神奈川大学 理学部 生物科学科  
 3) 昭和薬科大学 物理化学研究室  
 4) 分子イメージング研究センター 先端生体計測研究グループ

10

### 最近の成果

#### 「光学望遠鏡で探す地球外文明」

Optical Search for Extra-Terrestrial Intelligence with the largest telescope in Japan  
-なゆた望遠鏡でのOSETI(光学的地球外知的生命探査)-

兵庫県立西はりま天文台  
鳴沢 真也

16

### 研究者のあゆみ

#### 「かつての研究公務員の回想」

A review of a former government researcher

-PET装置開発研究-

分子イメージング研究センター  
先端生体計測研究グループ  
村山 秀雄

29

### 公開講座のお知らせ

「放射線・人の心・重粒子線がん治療を知る」

30

### 随想

市川 龍資

31

### 編集後記



▲写真(左): 可視分光器に液体窒素を注入している様子 写真(中央): 光学的地球外知的生命探査を体験する子供たち  
写真(右): 長時間連続して行われる光学的地球外知的生命探査の観測

▲国内最大の光学望遠鏡「なゆた」が設置されている兵庫県立西はりま天文台公園  
(佐用町大撫山頂436m、手前側建屋: 天文台南館、奥側建屋: 同 北館)



◀32年前(1977年)の放医研の風景と  
頭部用2次元PET装置Positologica-I  
(左): 放医研・西側(正門)  
(右): 頭部用2次元PET装置Positologica-I  
(放射線検出用結晶素子の総数は64)



◀現在(2009年)の放医研の風景と  
頭部用3次元PET装置 jPET-D4  
(左): 放医研・西側(正門)  
(右): 頭部用3次元PET装置 jPET-D4  
(放射線検出用結晶素子の総数は122,880)



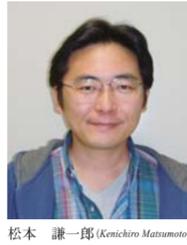
当所が建設された1957年に造られた本部棟の中庭の  
モニュメント(建築時には何を模して造られたかなどは不  
明ですが、このモニュメントには最先端の研究を担って  
いくことへの当時の期待が込められているように思います)

# 重粒子(炭素)線が生成する活性酸素を可視化する

—MRIによる高解像度レドックスイメージングの応用—

重粒子医科学センター 粒子線生物研究グループ  
松本 謙一郎

- 永田 桂<sup>1),2)</sup>、山本 晴彦<sup>2)</sup>、遠藤 和豊<sup>3)</sup>、安西 和紀<sup>1)</sup>、青木 伊知男<sup>4)</sup>  
 1) 重粒子医科学センター 粒子線生物研究グループ  
 2) 神奈川大学 理学部 生物科学科  
 3) 昭和薬科大学 物理化学研究室  
 4) 分子イメージング研究センター 先端生体計測研究グループ



松本 謙一郎 (Kenichiro Matsumoto)

## はじめに

放医研 HIMAC における重粒子線癌治療が1994年6月に開始されてから約15年が経過し、登録患者数も延べ4500人以上に達しています。重粒子線癌治療の全国への普及を目指し、群馬大学でもHIMACの研究を礎とする普及小型化装置の建設が2006年に始まり、その完成も間近に迫っています。このような背景に基づき、これまで以上に質の高い治療を目指して、重粒子線がん治療の更なる高度化が求められています。重粒子医科学センター・粒子線生物研究グループでは、重粒子線治療が他の放射線による治療に比べてなぜ有効なのかを生物学的に解明し、更に有効な放射線治療法を提案すべく研究に取り組んできました。その中で放射線効果修飾チームでは、より効果的に癌を退治することを目指して、放射線がん治療の効果を増強する放射線増感剤や、正常細胞への障害を少なくする放射線防護剤の研究を行っています。我々は、放射線が生じる活性酸素の生成を制御することがそのための鍵となると考えて研究を進めてきました。

活性酸素は主に、水に放射線が当たって生じる反応性の高い分子種と水中に溶けている酸素とが反応することにより生成し、これが出来やすいかどうか放射線の酸素効果を生み出します。重粒子線の生体への作用では、他の放射線治療と比較して酸素効果が少ないと考えられてきましたが、近年、重粒子線癌治療においても活性酸素の生成とそれに伴う酸素効果を意識する必要性を示す報告が出始めています<sup>1)-3)</sup>。直感的には生成する活性酸素を利用して癌細胞により大きなダメージを与えるということも考えられますが、むしろ逆に、活性酸素の発生量や発生箇所をとらえてこれを抑制することができれば、治療時に正常な細胞の保護に用いることができ、正常組織を確実に保護することが出来れば、今よりも治療線量を上げることが可能になり効率的な治療に繋がります。

すなわち、従来以上にきめ細かいがん治療(高度化)を目指すうえで、抗酸化物質を治療に併用してがん組織の周囲の正常組織を保護してやるのが、今後の重粒子線治療の1つの方向性と考えられます。しかしX線やγ線も含め、放射線による活性酸素の発生量や場所を視覚的にとらえた例はありませんでした。特に重粒子線ではそのLETと線量の分布が特徴的であるため、重粒子線を照射した試料内部のどこにどれだけの活性酸素が発生するのかを視覚的にとらえることが重要と言えます。

## ニトロキシルラジカルによる活性酸素の検出

図1にニトロキシルラジカルの酸化還元サイクルを示しました。ここに示すようなニトロキシルラジカルは比較的安定なフリーラジカル種で、特徴的な3本線の電子常磁性共鳴(EPR)スペクトルを持ちます。ニトロキシルラジカルは、ヒドロキシルラジカル( $\cdot\text{OH}$ )やスーパーオキシド( $\cdot\text{O}_2^-$ )などの活性酸素種によって酸化されオキシアンモニウムカチオンとなります。オキシアンモニウムカチオンとグルタチオン(GSH)が共存すると、安定な複合体を生成し、そのEPRシグナルが消失します。またオキシアンモニウムカチオンとNAD(P)H等の水素供与体が共存すると、オキシアンモニウムカチオンが水素を受け取りヒドロキシルアミンへ還元され、この場合もEPRシグナルが消失します。しかしヒドロキシルアミンは、 $\cdot\text{OH}$ などによって酸化され、再びニトロキシルラジカルとなりEPRシグナルが回復することも知られています。また、比較的高線量を照射した場合には、ニトロキシルラジカル単独でもEPRシグナルが消失し、この反応には生成する過酸化水素( $\text{H}_2\text{O}_2$ )が関与することが最近の研究で分ってきました。これらの反応系に放射線を照射した時、常磁性のニトロキシルラジカルが非常磁性のヒドロキシルアミン体やGSHとの複合体となりEPRシグナルが消失する様

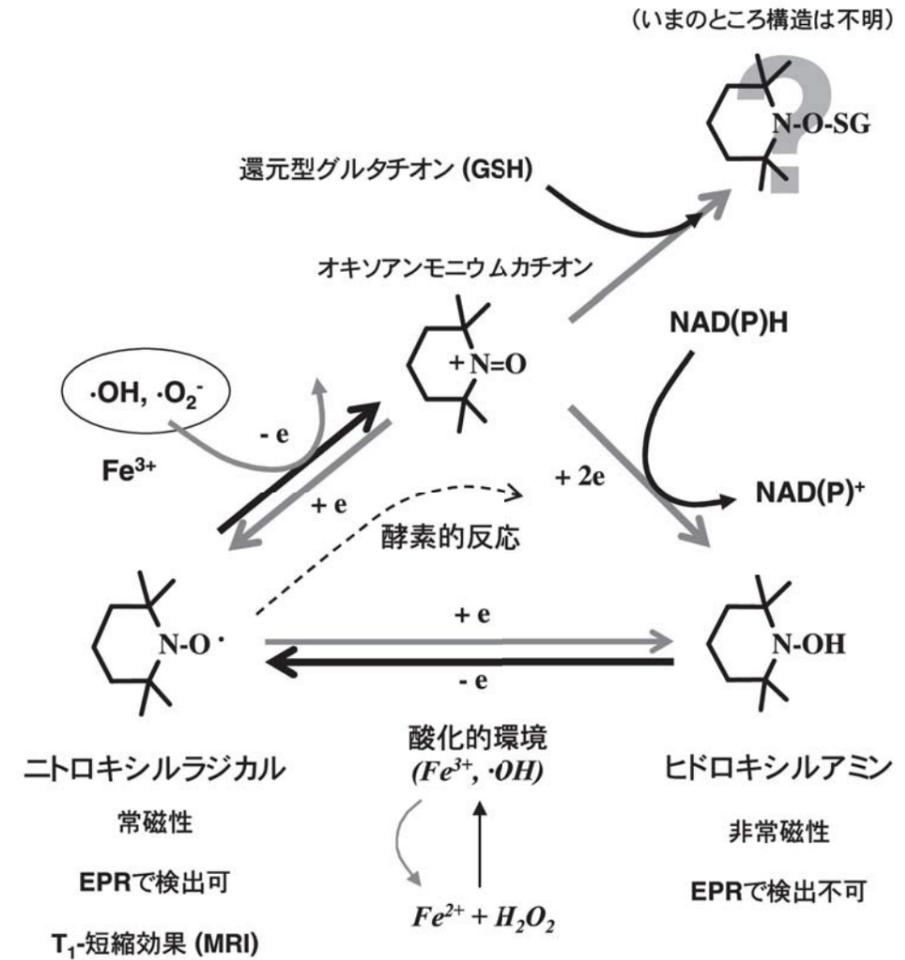


図1: ニトロキシルラジカルの酸化還元サイクル。

子、あるいはヒドロキシルアミン体が酸化されてニトロキシルラジカルのEPRシグナルが回復する様子を観察すれば、試料内での活性酸素種の生成を検出することが出来ます<sup>4),5)</sup>。更にEPRイメージングの技術と組み合わせたり、あるいは常磁性のニトロキシルラジカルはMRIでも検出できるので、試料内の活性酸素の生成を可視化することも可能です<sup>6)</sup>。

## 方法

酸化還元のプロープとして、ニトロキシルラジカルであるTEMPOL (Hydroxyl-TEMPO)、あるいはそのヒドロキシルアミン体(TEMPOL-H)を用いました。0.05mMのDTPAを含む100mMのリン酸バッファー(pH 7)(以下PB)を溶媒として用いました。

EPR測定用の試料は、先ずゼラチンを約80℃のPBに溶かして3.5%のゼラチン溶液とし、これを室温まで冷ましてからTEMPOLとGSHを加え、最終濃度をそれぞれ0.1mM、1mMとしました。ゼラチン溶液をT-25細胞培養フラスコに入れて冷蔵庫で約2時間かけて固めました。この試料表面での線量とLETを指定して、HIMAC生物照射室で290MeV/nの炭素線モノビームを照射しました。この時、試料表面での線量は16Gy、LETは様々な値を指定しました。照射後直ちに、キャピラリーを使って表面のゼラチンを採取し、ニトロキシルラジカルの消失量をX-band EPRで測定しました(図2A)。

MRI測定ではラジオ波吸収による発熱でゼラチン試料が溶け出さないよう考慮して、ゼラチン濃度を14%と高くして更に20%の蔗糖を加えまし

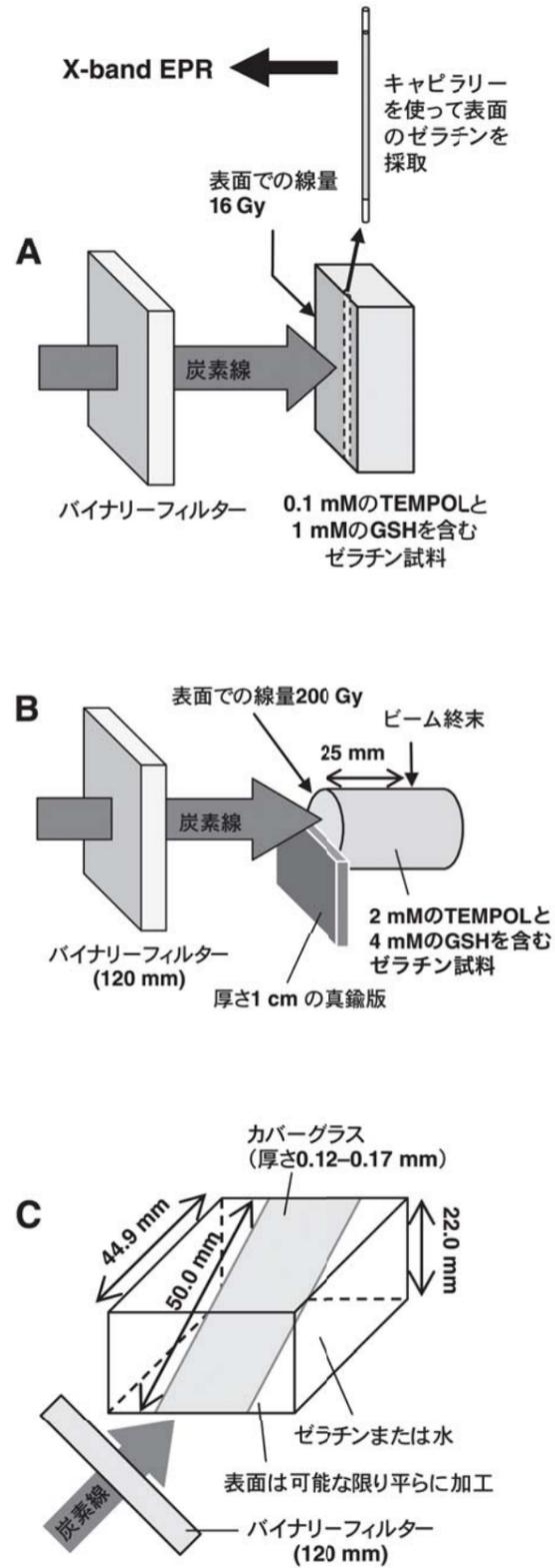


図2: 試料の形状と炭素線照射の方向。

た。このゼラチン試料は25℃でもその形状を保持することができます。80℃で溶かしたゼラチン溶液を室温付近まで冷ましてから、TEMPOLとGSHを加え、それぞれの最終濃度を2mMおよび4mMとしました。これを円柱型のプラスチック容器に入れて固めました。120mmのバイナリーフィルター (BF) を通して、また試料表面での線量を200Gyとして炭素線モノビームを照射しました(図2B)。照射約30分後に、7TのMRI装置を用いて試料の垂直断面をT<sub>1</sub>強調画像法で撮像しました。

図2Cに示す様に、カバーガラス(厚さ0.12~0.17mm)をプラスチック容器に斜めに設置し、容器内を水またはゼラチン溶液で満たしました。容器に水を入れた場合は、その表面が可能な限り平坦になるようにパラフィルムで封をしました。ゼラチン溶液は、表面が可能な限り平坦になるように注ぎ、冷蔵庫で約2時間かけて固めました。120mmのバイナリーフィルター (BF) を通して、また試料表面での線量を128Gyとして炭素線モノビームを照射しました。照射後、カバーガラスを取り出し、蒸留水で洗い、イメージングプレートに焼き付けました。

### 結果と考察

TEMPOLとGSHを含む反応系に炭素線を照射すると、同一線量を与えた時にはLETが高くなるのに伴ってTEMPOLのEPRシグナルの消失量が少なくなる傾向が見られました(図3)。すなわち、TEMPOLとGSHが共存する反応系では、 $\cdot\text{OH}$ と $\cdot\text{O}_2^-$ の総合的な反応を検出しており、LETが高くなるほどそれらの生成量が少なくなることを示しています。この結果は盛武ら<sup>1)</sup>がDMPOで $\cdot\text{OH}$ を直接トラップして測定した結果と一致します。しかし一つの大きな試料へ炭素線を照射した場合を考えると、深さに依存して試料に与えられる線量も変化することになるので、一回の照射で一つの試料内に生じるフリーラジカル反応量を評価するには値を補正する必要があります。そこでTEMPOLのEPRシグナル消失量を一定の照射時間当たり補正し、これをLETに対応する水の深さ(換算値)に対してプロットすると、活性酸素生成は試料の浅い部分からビームの終末付近まではほぼ一定の量であることが予想できました(図4)。

そこで次に、この反応系を含むゼラチン試料に炭素線を照射して、T<sub>1</sub>強調MRIでその断面を観察しました。その結果、ビームの当たった部分に一致して画像強度の減弱が見られました(図5A)。これは、ニトロキシラジカルが活性酸素と反応してそのMRI造影効果を失うことを

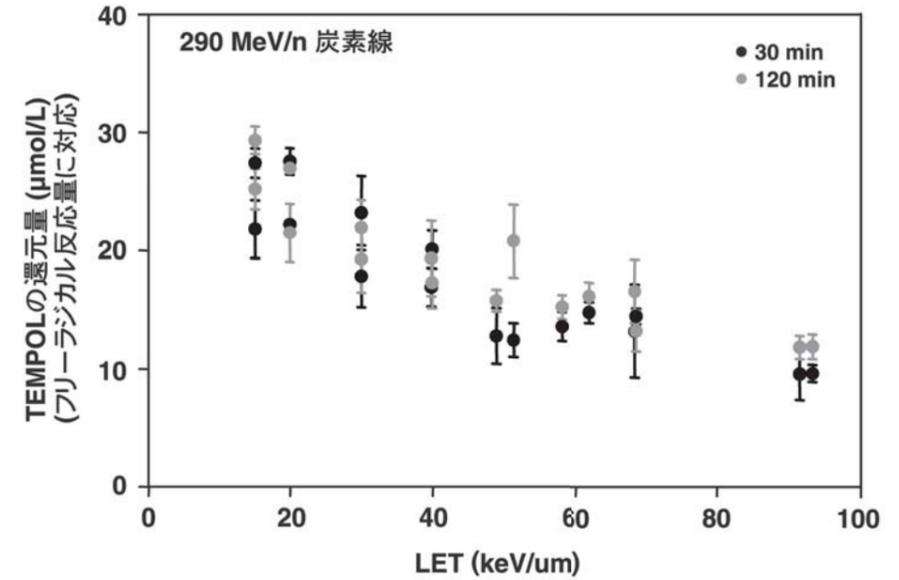


図3: 一定線量におけるTEMPOLの消失量(活性酸素生成量)とLETとの関係。

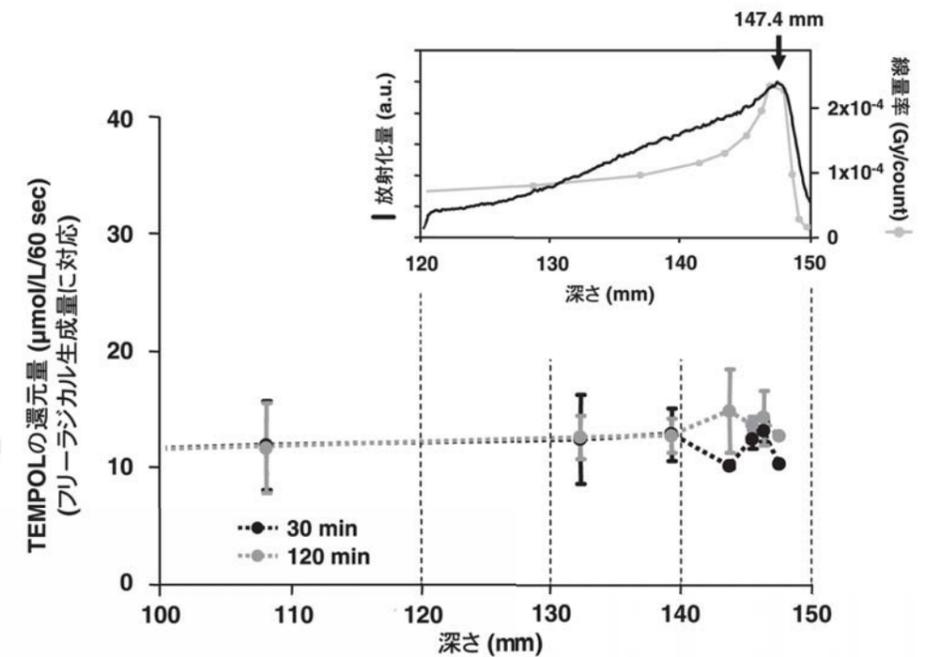


図4: 炭素線を照射したゼラチン試料内のフリーラジカル反応量(TEMPOLのEPRシグナル消失量)と深さ(水換算)との関係。右上の挿入図は、別に測定した放射化量と線量率の分布を示す。

利用しており、活性酸素が発生した部位で画像強度が減弱する様子を画像として捉えたものです。これを詳しく解析すると、EPRの結果と同様、試料の浅い部分からビーム終末まではほぼ一定の活性酸素の生成が観察されました。活性酸素生成は、ビーム終末付近に小さいピークを見せ、

ビームの終末よりも深い部分では活性酸素生成は見られませんでした(図5B)。ビーム終末付近での活性酸素の生成は、同じ線量のX線と比べると、約1/3以下であることが確認できました。

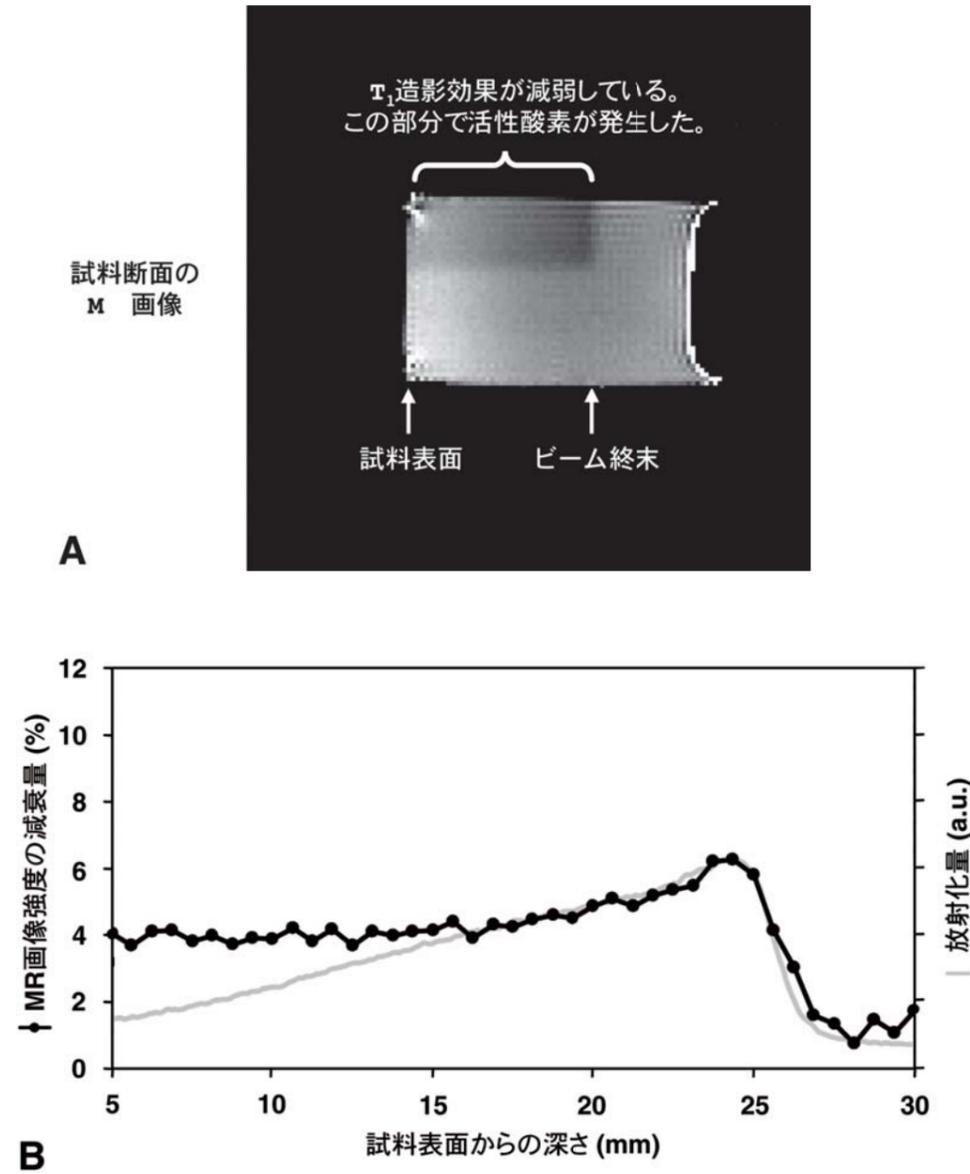


図5: MRIによる炭素線を照射したゼラチン試料内のフリーラジカル反応の視覚化

この成果により、今後の重粒子線治療の高度化に向けて我々が対処すべき物質の存在とその生成する場所を見ることが出来ました。すなわち、抗酸化剤を併用するなどして活性酸素の生成を抑制し腫瘍の周囲の正常組織の犠牲を減らしていくことが、今後の重粒子線治療の高度化に繋がり、これによって、より効果的かつ安全ながん治療を実現できる可能性が強まります。活性酸素の生成量とその分布が見えたことは、重粒子線がん治療における活性酸素生成を制御するうえで極めて重要な情報であるといえます。

### おわりに

この研究で用いた反応系をそのまま適用して生体内での活性酸素生成を観察することは難しいかも知れませんが、ニトロキシルラジカルは生体組織内のレドックス環境に反応してそのMR造影効果が変わるので、正常組織とのレドックス環境の違いを利用して、がん組織のMRI画像診断にも利用できます<sup>7)-9)</sup>。また、活性酸素と反応するという特性は、それ自体に活性酸素を消去する効果があるということであるので、それが抗酸化剤として働くことを意味します。すなわち1回の投与で診断、

治療時の活性酸素低減と、2つの効果が得られる可能性も持っています。ニトロキシルラジカルの放射線防御剤としての適用は既に米国で始まっており、頸頭部癌の放射線治療に伴う脱毛防止の目的でTEMPOLの外部適用の臨床試験<sup>10)</sup>が行われ、現在は第2相試験まで進んでいます。今後、測定条件の最適化・高感度化、また、ニトロキシルラジカルの集積化により、診断と治療の両面から重粒子線治療の高度化に貢献できればと考えています。

### 謝辞

本研究の一部は、平成19年度理事長調整費萌芽的研究として行われました。また本研究は、HIMAC共同利用研究課題18B473として行われました。HIMACの運営にかかわってくださったスタッフの皆様に感謝いたします。本研究の成果は、米国磁気共鳴医学会の科学雑誌『Magnetic Resonance in Medicine』5月号に掲載されました<sup>6)</sup>。

### 参考文献

- Moritake T., Tsuboi K., Anzai K., Ozawa T., Ando K., and Nose T., "ESR spin trapping of hydroxyl radicals in aqueous solution irradiated with high-LET carbon-ion beams." *Radiat. Res.*, 159, 670-675, 2003.
- Hirayama R., Furusawa Y., Fukawa T., and Ando K., "Repair kinetics of DNA-DSB induced by X-ray or carbon ions under oxic and hypoxic conditions." *J. Radiat. Res.*, 46, 325-332, 2005.
- Ito A., Nakano H., Kusano Y., Hirayama R., Furusawa Y., Murayama C., Mori T., Katsumura Y., and Shinohara K., "Contribution of indirect action to radiation-induced mammalian cell inactivation: dependence on photon energy and heavy-ion LET." *Radiat. Res.*, 165, 703-712, 2006.
- Matsumoto K., Okajo A., Kobayashi T., Mitchell J.B., Krishna M.C., and Endo K., "Estimation of free radical formation by beta-ray irradiation in rat liver." *J. Biochem. Biophys. Methods.*, 63, 79-90, 2005.
- Matsumoto K., Okajo A., Nagata K., Degraff W.G., Nyui M., Ueno M., Nakanishi I., Ozawa T., Mitchell J.B., Krishna M.C., Yamamoto H., Endo K. and Anzai K., "Detection of free radical reactions in an aqueous sample induced by low linear-energy-transfer irradiation." *Biol. Pharm. Bull.* 32, 542-547, 2009.

- Matsumoto K., Nagata K., Yamamoto H., Endo K., Anzai K., and Aoki I., "Visualization of free radical reactions in an aqueous sample irradiated by 290 MeV carbon beam." *Magn. Reson. Med.* 61, 1033-1039, 2009.
- Matsumoto K., Hyodo F., Matsumoto A., Koretsky A.P., Sowers A.L., Mitchell J.B., and Krishna M.C., "High-resolution mapping of tumor redox status by magnetic resonance imaging using nitroxides as redox-sensitive contrast agents." *Clin. Cancer Res.*, 12, 2455-2462, 2006.
- Hyodo F., Matsumoto K., Matsumoto A., Mitchell J.B., and Krishna M.C., "Probing the intracellular redox status of tumors with magnetic resonance imaging and redox-sensitive contrast agents." *Cancer Res.*, 66, 9921-9928, 2006.
- Cotrim A.P., Hyodo F., Matsumoto K., Sowers A.L., Cook J.A., Baum B.J., Krishna M.C., and Mitchell J.B., "Differential radiation protection of salivary glands versus tumor by Tempol with accompanying tissue assessment of Tempol by magnetic resonance imaging." *Clin. Cancer Res.*, 13, 4928-4933, 2007.
- Metz J.M., Smith D., Mick R., Lustig R., Mitchell J., Cherakuri M., Glatstein E., and Hahn S.M., "A phase I study of topical Tempol for the prevention of alopecia induced by whole brain radiotherapy." *Clin. Cancer Res.*, 10, 6411-6417, 2004.

## 光学望遠鏡で探す地球外文明

—なゆた望遠鏡でのOSETI(光学的地球外知的生命探査)—



鳴沢 真也 (Shinya Narusawa)

兵庫県立西はりま天文台  
鳴沢 真也



写真1: 兵庫県立西はりま天文台 (所在地: 兵庫県佐用町)

### OSETI(光学的地球外知的生命探査)

中性水素原子が放射する波長 21cm (1420MHz) の電波は、天文学者によってよく観測されている。そこで、地球外知的生命 (Extra-Terrestrial Intelligence、以下 ETI) がこの波長にメッセージを入れて電波送信してくる可能性がある。1959年、ココーニとモリソンはこう考えて、波長 21cm での地球外知的生命探査 (Search for Extra-Terrestrial Intelligence、以下 SETI) を提唱した<sup>1)</sup>。翌年、独立に同じアイデアを持ったフランク・ドレイクは、国立電波天文台の 26m アンテナを実際に星に向けてみた<sup>2)</sup>。史上初の SETI 観測である。それ以降現在までにアメリカを中心として約 80 の電波 SETI プロジェクトが実行されている。日本では東海大学の藤下光身氏が2回実施された。

今回紹介する話題は、電波検出が目的の SETI ではない。光学望遠鏡を用いた可視光線観測による SETI である。この場合は特に、光学的地球外知的生命探査 (Optical Search for Extra-Terrestrial Intelligence、以下 OSETI) という。こちらの場合もいろいろとユニークな方法が実施されているが、通常 OSETI と言うと ETI が放射するハイパワーレーザー光線の検出を目的とした手法をさす。提唱者はシュワルツとタウンズで 1961 年のことである<sup>3)</sup>。タウンズは後に、レーザー光線の発見及び量子エレクトロニクスの基礎的研究によりノーベル物理学賞を受賞している。初の OSETI は、1970 年代に旧ソビエトで始まり、6m 望遠鏡なども使用されていた<sup>4)</sup>。アメリカでは 1990 年代から盛んとなり、現在はハーバード大学、プリンストン



写真2: 日本最大の光学望遠鏡。2m「なゆた」。左側のテーブルに鎮座している黒い箱が可視分光分光器 (MALLS)。

大学、カリフォルニア大学パークレー校、リック天文台などで実施されている。南半球では、オーストラリアでも行われている。これらは主にナノ秒パルスレーザーの光子を光電子増倍管で検出する方法である<sup>5)</sup>。一方で、レイネスとマーシーは、星のスペクトルの中に ETI が放射したレーザー光線の兆候がないかを調査した<sup>6)</sup>。

筆者らは、2005 年から日本で初めての OSETI を実施しているので、ここで紹介する。

### 日本最大の光学望遠鏡: なゆた

兵庫県立西はりま天文台 (写真1) のなゆた望遠鏡は、主鏡の口径が 2m あり、日本国内にある光学望遠鏡としては最大である (写真2)。この望遠鏡は研究観測だけではなく、一般の方も星を観察することが可能であり、またいわば「天文学者プチ体験」的な企画でも使用されている。一般向けの公開も行っているという条件をつけると、なゆた望遠鏡は世界最大の望遠鏡なのである。

なゆた望遠鏡には、星を覗いて観察するための眼視観望装置の他に、高感度ハイビジョンカメラ、可視光撮像装置 (冷却 CCD カメラ)、近赤外線カメラ、そして OSETI に

も使用されている可視分光分光器 (MALLS) などが装着されている。

### 基本原理

現在なゆた望遠鏡で行っている OSETI は、基本的には先ほど紹介したレイネスとマーシーの方法に基づいている。彼女らは、世界最大のケック望遠鏡で取得された太陽類似の恒星 (以下太陽型星) の高精度スペクトルの中に、ETI からのレーザー光線が含まれていないか調査を行った。恒星がレーザー光線のような波長幅の極めて狭い輝線を放射することはないので、恒星のスペクトルにもしそのような兆候が検出されれば、地球外文明からのレーザーシグナルの可能性が考えられるわけである。

地球人の観測装置で検出するためには、ETI はどの程度のエネルギーでレーザー光線を放射すればよいだろうか? 地球に到達した時、レーザー光線は空間的には母星 (中心の恒星) からの光と分離できない。例えば、(いくつかの仮定をするが) 1000 光年先の星からレーザー光線が放射されると、太陽系に届いた時には太陽 - 地球間の 3 倍程度まで広がってしまう。そこでレイネスらは、レーザー放

射コーンの中に含まれる母星の光の割合（幾何学的計算）、分光器の波長分解能、観測のノイズ（誤差論）などを考慮し、どちらかにレーザー光線が含まれていると仮定した2つのスペクトルの差（以下差分スペクトル）の中に検出されるレーザー光線のエネルギー E を計算する次式を導いた。

$$E = \frac{1}{4\pi} * \left(\frac{\lambda}{a}\right)^2 * \left\{ \frac{1}{(W/\Delta\lambda)} \right\} * (\sqrt{2}/SN) * N * L * (T/n * pw)$$

この式をレイネスのファーストネームから「エミーの式」と呼ぶことにする。パラメータの説明と筆者らが採用した数値は以下である。

エミーの式から導かれる解、つまりなゆた望遠鏡で得られた差分スペクトルにシグナルと判定されるレーザー光線のエネルギーは、10 ペタ (10<sup>16</sup>) [W] となる。現在、地球上で最強のレーザー光線は大阪大学レーザーエネルギー学研究中心に今年3月に完成した LFEX で、そのパワーがちょうど10 ペタ [W] である。我々が検出を想定しているのは、地球人レベルの文明なのである。

### 可視光分光器 (MALLS)

ここで、なゆた望遠鏡のナスマス焦点に装着されている可視光分光器 (MALLS: Medium And Low-dispersion Longslit Spectrograph) について簡単に紹介する。レイアウトを図1に示す。

スリットを通過した光はコリメーターによって平行光束にされる。分散素子としてはブレース付き反射回折格子 (グレーティング) を用いており、グレーティングを回転させることで、中心波長を任意に選択することが可能となっている。グレーティングは最大3種類装着することが可能である (OSETI では1800本/mm を利用している)。

形成されるスペクトルは液体窒素で冷却される CCD カメラにより撮像される。また MALLS 内には波長校正用光源 (Fe、Ne、Ar) などが搭載しており、鏡の抜き差しで切り替えられるようになっている。

### 観測波長

MALLS 内の冷却 CCD カメラが一度に撮像可能な波長域は、430 Å と狭い。そこで ETI が放射するレーザー光線の波長を前もって仮定しておいた方が効率的である。筆者らは高効率、大出力の YAG レーザーの中で最強のもの (R2 → Y3) の第2次高調波 (1/2 波長) である 5320.7 Å を観測の中心波長としている。第2次高調波

YAG は様々な用途で地球人に使用されている。例えば海上保安本部下里水路観測所が測地の目的で、これを人工衛星に向けて照射していた。本来の YAG の波長は 1 μ 程度であるが、これだと航空機の航行などに問題があるために、可視光に変換して放射していたのである。太陽型を母星としている ETI なら人間と同じく可視光線しか感知できない可能性があり、同様の理由で第2次高調波 YAG を用いてレーザー光線を送ってくる可能性がある。MALLS の量子効率がこの波長付近で最大となっているのも、もう一つの理由である。

### ターゲット

1995年、ペガサス座51番星に史上初めて太陽系外の惑星が発見された。それ以降、恒星の周囲を公転する惑星がぞくぞくと発見され、2009年7月末日現在353個の惑星が発見されている。太陽系外惑星の研究は、現在天文学の中で最もホットな分野の一つとなっている。今年3月には、地球型惑星探査機「ケプラー」が NASA によって打ち上げられたので、地球型惑星発見のニュースが報道される日も近いであろう。

さて、我々の観測ターゲットは、ハビタブルゾーン（液体の水が存在可能な範囲）内に惑星を持つ恒星系である。具体的には、かに座55番星とグリーゼ581などである。

かに座55番星は5つの惑星を持つが、このうち第4惑星はハビタブルゾーン内を公転している。第4惑星そのものはガス惑星であるが、この星に衛星があれば、そこには海が存在が期待される<sup>7)</sup>。一方、グリーゼ581は4つの惑星を持っており、第4惑星はハビタブルゾーンの中にある<sup>8)</sup>。

「エミーの式」のパラメータの説明と筆者らが採用した数値

a	: レーザー光線発信望遠鏡の口径	10 [m]	(現在、地球最大の望遠鏡の口径)
λ	: レーザー光線の波長	5320 [Å]	(第2次高調波 YAG)
W	: 太陽型星の可視光波長幅	4000 [Å]	
Δλ	: 分光器の波長分解能	0.6 [Å]	(MALLS 中分散モード)
SN	: S/N 比	200	
N	: ノイズと信号を区分する数値	6 σ	
L	: 太陽型星の光度	3.8*10 <sup>26</sup> [W]	
T	: 露出時間	60 [sec]	
n	: 露出時間内でのレーザー光線放射回数	1	
Pw	: レーザー光線のパルス幅	1 [ns]	

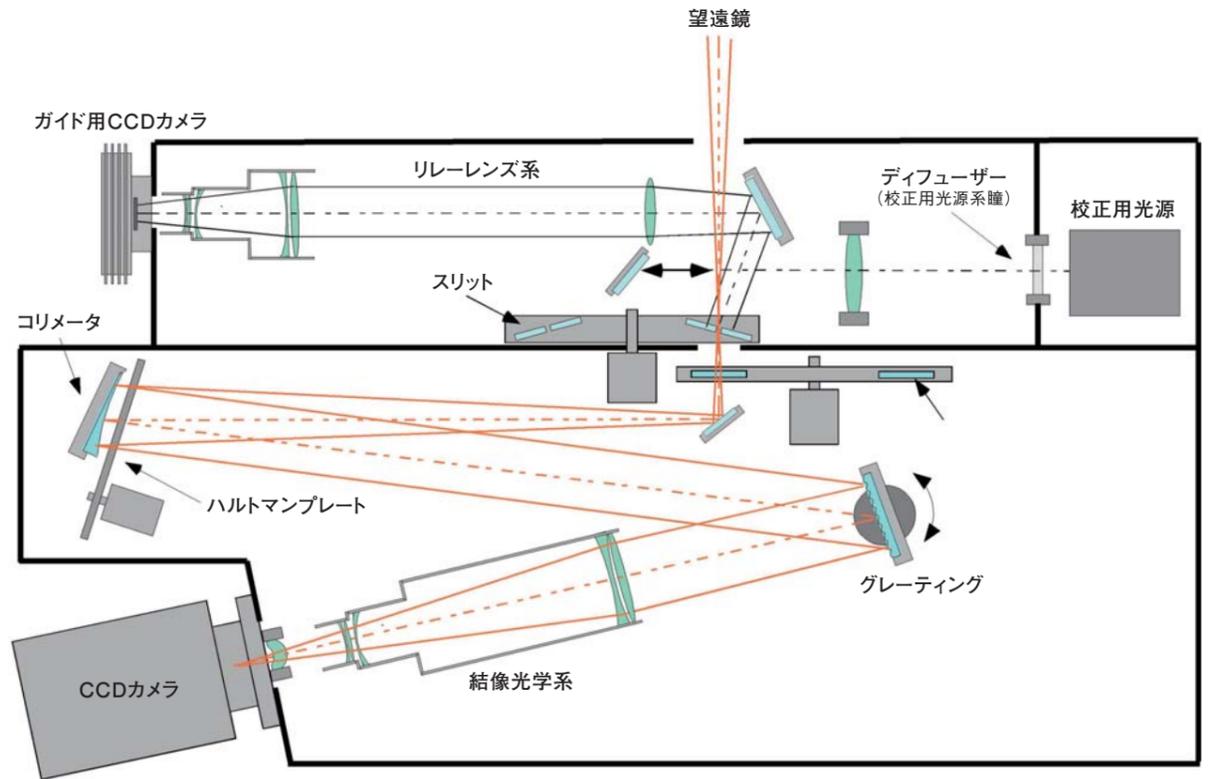


図1: 可視光分光器 (MALLS) のレイアウト

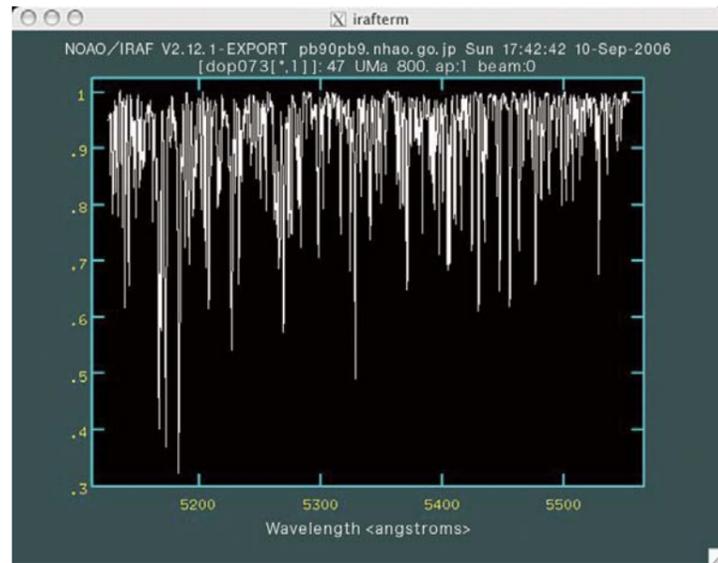


図2: 実際の観測スペクトルの例。  
吸収線は恒星大気中の原子による。

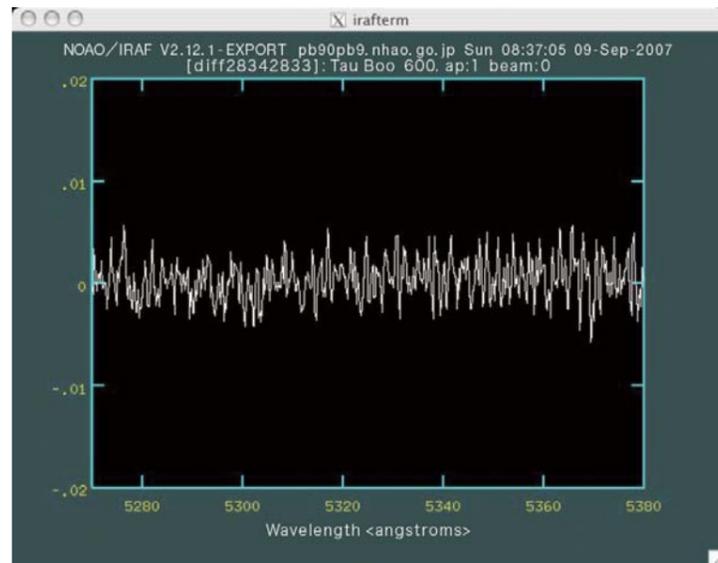


図3: 差分スペクトルの例。  
第2次高調波YAG(5320.7Å)付近の拡大。

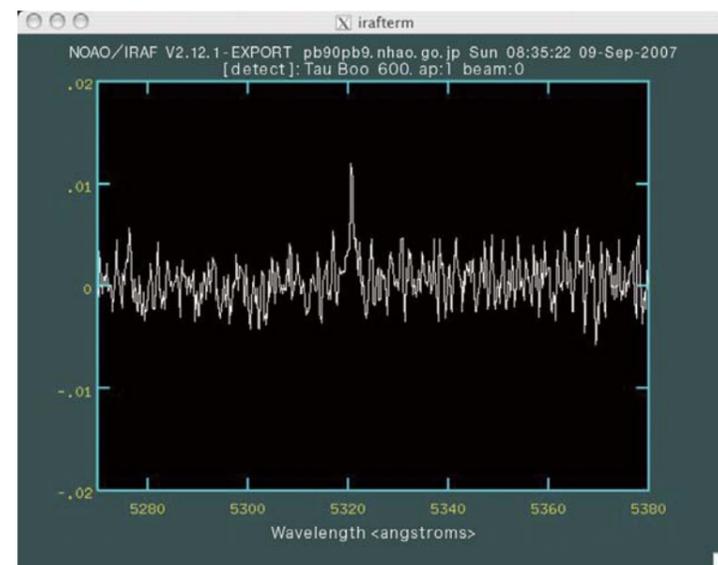


図4: 仮想シグナル。  
ノイズレベルの6倍の場合。

## 実際の観測

2005年9月からなゆた OSETIを開始した。2009年7月までに、10天体を約50夜にわたって観測した。このうち10数回は、一般の方にも観測の体験をしていただいた。

現在までに得られたデータには、明瞭なシグナルは検出されていない。観測スペクトルの例を図2に、差分スペクトルの例を図3に示す。レーザー光線がノイズレベルの6倍の信号として到来した場合の合成スペクトルが図4である。

もし実際にETIからのパルスが検出された場合は、IAA (国際航行アカデミー) が草案し、IAU (国際天文学連合) も1991年に採択しているガイドライン「地球外知的生命の発見後の活動に関する諸原則についての宣言」に従う予定である。

なお、なゆた OSETI などの詳細については、筆者による著書<sup>9),10)</sup>を参照されたい。

## なぜ宇宙に文明を探すのか?

SETI、もちろんETIを発見することが最大の目的である。よその星にも人はいるのだろうか? これは古代ギリシャから問われ続けている人類の根本的疑問の一つである。それは、自分はこの宇宙の中で特殊な存在なのだろうか? という問いかけでもある。最近の言葉で例えるなら、SETIは「自分探しの旅」なのである。

なゆた OSETI は、幼児から大人まで一般の方々にも観測体験をしていただいた。こうした活動そのものにも意義があると考えている。単細胞生命として発生し、他の恒星に知性を検索するにまでに進化した人間。しかしその人間が繰り返す戦争、テロそして環境破壊。広大無辺な宇宙に隣人を探すというこの活動が、逆に小さな地球、そしてそこに住むかけがえのない人間を、参加者たちが見つめ直すきっかけになればよいと願っている。

## 参考文献

- 1) Cocconi, G. & Morrison, P. 1959 Nature 184, 844
- 2) Drake, F.D. 1960 Sky & Telescope 19, 140
- 3) Schwartz, R.M. & Townes, C.H. 1961 Nature 190, 205
- 4) Beskin, G. et al. 1997 Astrophysics and Space Science 252, 51
- 5) Howard, A.W. et al. 2004 The Astrophysical Journal 613, 1270
- 6) Reines, A.E. & Marcy, G.W. 2002 Publications of the Astronomical Society of the Pacific 114, 416
- 7) Fischer, D.A. et al. 2008 The Astrophysical Journal 675, 790
- 8) ESO Science Release (21 April 2009)
- 9) 鳴沢真也「137億光年のヒトミ ―地球外知的生命の謎を追う―」そうえん社 ISBN4-88264-301-4
- 10) 鳴沢真也「望遠鏡でさがす宇宙人」旬報社 ISBN978-4-8451-1107-7

# かつての研究公務員の回想

—PET装置開発研究—

分子イメージング研究センター  
先端生体計測研究グループ  
村山 秀雄



村山 秀雄 (Hideo Murayama)

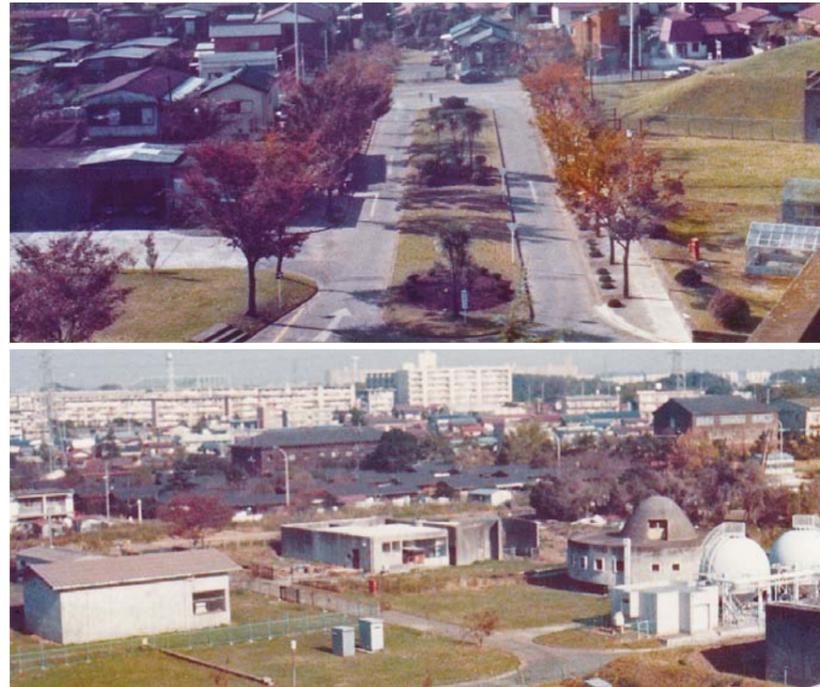


写真1:32年前(1977年)の放医研の風景  
(上):放医研・西側(正門)  
(下):放医研・北東側(ガンマ線棟)

## はじめに

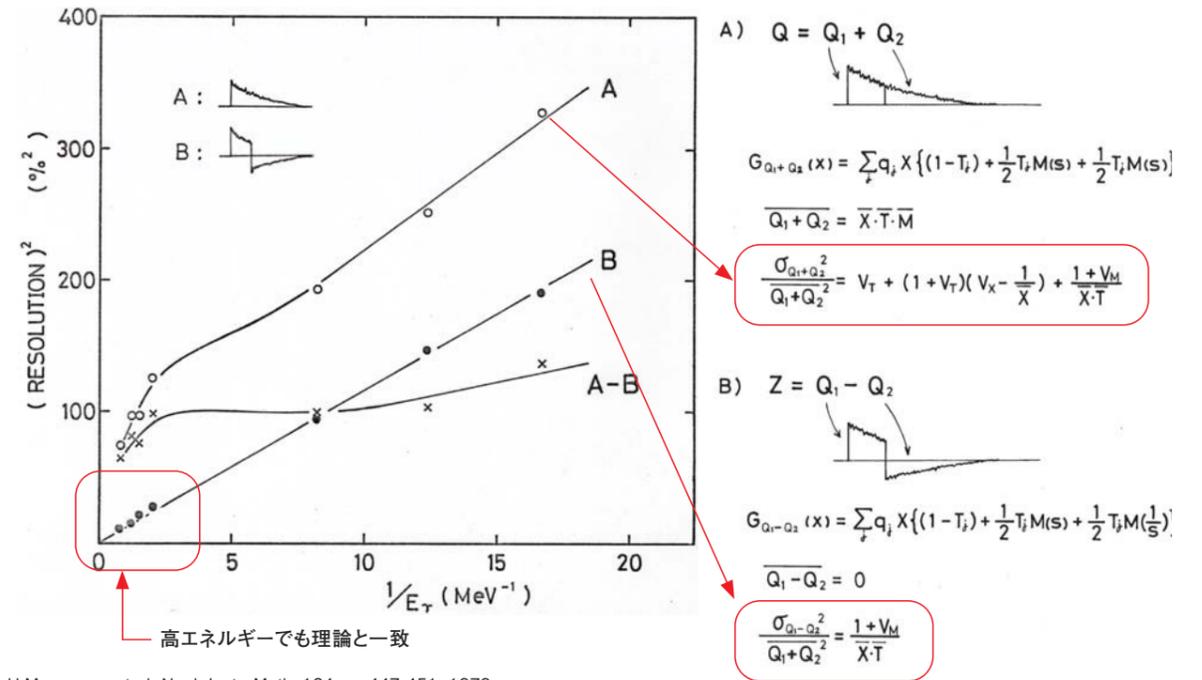
本稿は、平成 21 (2009) 年 3 月 23 日と 24 日に放医研・重粒子治療推進棟大会議室で行った核医学物理セミナーおよび退職者講演会における講演を下にまとめたものである。思い起こせば昭和 51 (1976) 年 9 月、私は放医研の物理研究部において核医学イメージング装置開発研究を担う一員として、研究公務員の職に就いた。それから約 33 年を経て平成 21 (2009) 年 3 月 31 日に定年退職を迎えたわけであるが、その間は決して平坦な道というわけではなかった。写真 1 は 32 年前の放医研の風景である。西側の正門並木は、まだ華奢であったが今は立派な巨木に育っている。一方、北東側風景に見られる円盤形のガンマ線棟は、現在跡形も残っていない。

8 年前の平成 13 (2001) 年に、放医研が国立研究所(国研)から独立行政法人(独法)に移行したことに伴い、それまでの「研究公務員」から「研究員」へと私の職責は変わった。この国研から独法への移行により、研究所の管理部門は大変な苦勞を強いられ、現在も新たな組織を

軌道に乗せるべく懸命に努力されていると思う。しかし、私の携わってきた研究の現場では、25 年間にわたる研究公務員としての仕事の内容まで変化が生じたわけではなかった。特に装置開発研究の進捗は、世界の経済動向に左右されやすい。世の中の状況を的確に判断して研究を推し進めるとともに、関連分野と協力して成果を上げることが重要であり、そのための舵取りが必須となる。すなわち、これまで培ってきた基礎研究と要素技術の実績の上に立って、総合的な見地から時期を得た装置開発研究を行うことが肝要であった。

私が行ってきた仕事の内容を整理する便宜上、国研か独法かとは無関係に、放医研において私が勤めた 33 年間で 10 年単位で区切りたい。以下においては 10 年ごとに順を追って成長期、船出期、挑戦期とし、最後の 3 年を展開期とすることで合わせて 4 つの期間に分けて、それぞれの期間ごとに私の研究生活の回想を述べることにする。最後に、老婆心ながら放医研の研究者への期待を込めて、国研の研究者魂について述べる。

## シンチレーション検出器のエネルギー分解能に関する成分の分離測定 (信号分割法)



H.Murayama, et al: Nucl. Instr. Meth.,164, pp.447-451, 1979

図1:シンチレーション検出器の基礎研究

## 成長期(1976~1985年)

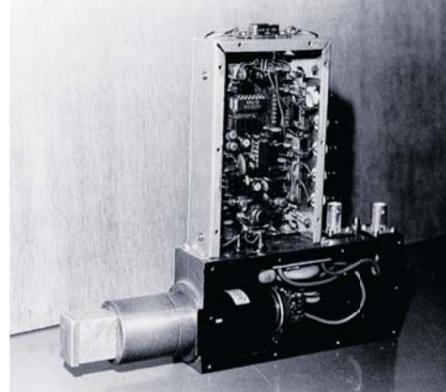
私は、大阪大学大学院理学研究科の修士課程において、杉本健三教授の下でベータ壊変を利用した原子核構造の研究に関する実験の指導を受けた後、愛知県にある小さな会社に就職した。その会社は精密機械部品の製造企業であったが、放射性同位元素を用いた夜光塗料も扱うなど特異技術の導入には意欲的であった。放射線取扱主任者の資格をもつ私は、工場の放射線管理業務を行いつつ、幾つか渉外業務を任された。スイスの会社が開発した新型の自動金メッキ装置を担当し、日本における装置販売の総代理店契約をスイスで取り交わした仕事は、特に思い出が深い。このように会社の仕事を忙しくこなしていた時、放医研で装置開発を行う研究職を求める案内が突然私の元に届いた。入社前に私が国家公務員上級職試験(物理)に合格していたためである。昭和 51 (1976) 年 8 月に会社を退職し、縁あって放医研に採用されることとなったが、企業で様々な仕事に就いた経験は、私が装置開発研究を放医研で進める上で視野を広く保つのに役立った、と改めて感じている。

国家公務員という行政官を思い浮かべる人が多いと思う。行政官は事務系と技術系に大別される。しかし、技術系すなわち理・工・農・薬系の国家公務員は行政公務員のみで構成されるものではなく、研究公務員が存在する。当時は約 1 万人の研究公務員が国立試験研究機関に勤務

し、国の研究開発の一翼を担っていた。私と同期で放医研に入所した研究公務員は 10 名であったが、試験採用は私一人であり他は選考採用であった。これは、放医研が科学技術の急速な進歩に応じて、柔軟な人材採用を行っていたことを示している。昭和 52 (1977) 年 4 月に、1 週間の国家公務員上級職初任者研修が代々木の国立オリンピック記念青少年総合センターであり、千数百人の新規採用者の一人として著名な方々の講演を拝聴する機会があった。その中で、「成果を分かち合う。そのために国と行政がある。」と強調する福田赳夫首相の話や、「人が居れば資源は無限であると肌で感じている。」と言う松下幸之助松下電器会長の経験談、「集団を守るために猿でもエリートを養成する。」と説く中根千枝東大教授の話は、特に印象が深い。また、その後の科学技術庁関係者対象の初任者研修では、「原子力局」の歴史にまつわる石田寛人課長補佐の話が興味深く感じられた。

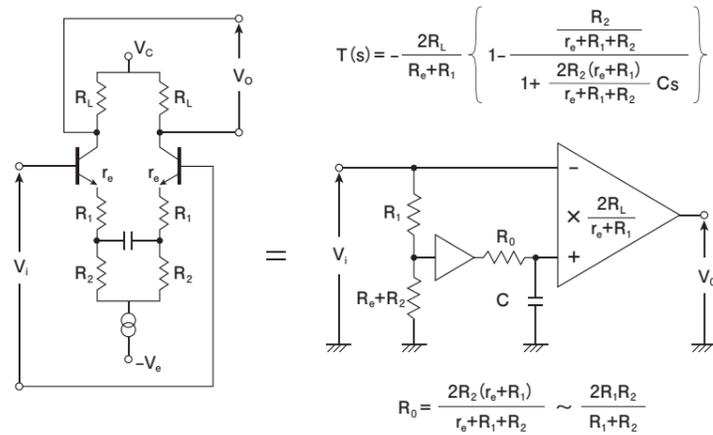
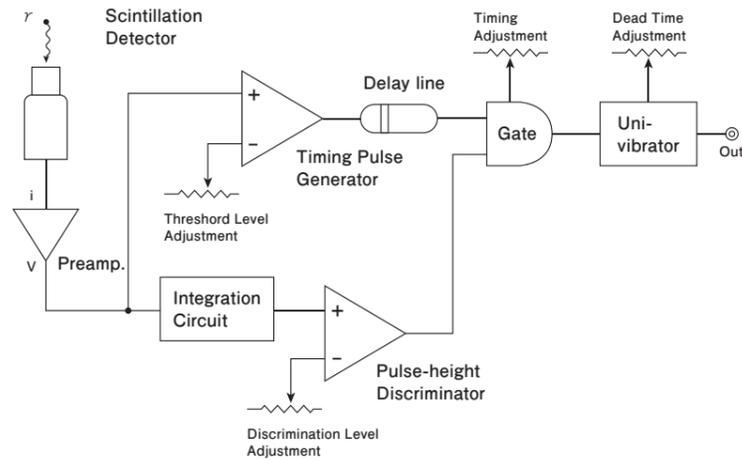
放医研に入所して最初の 10 年は、物理研究部物理第 1 研究室長の田中栄一先生の指導の下で、装置開発研究プロジェクトの一員として、主に陽電子放射断層撮影(PET)装置を試作する仕事に携わった。同時に個人的な仕事として、装置開発において要となる放射線検出器の基礎研究に取り組むことを決めた。その基礎研究の内容は、シンチレーション検出器の性能を制限する物理的因

1979年 Positologica-I 用BGO検出器を開発



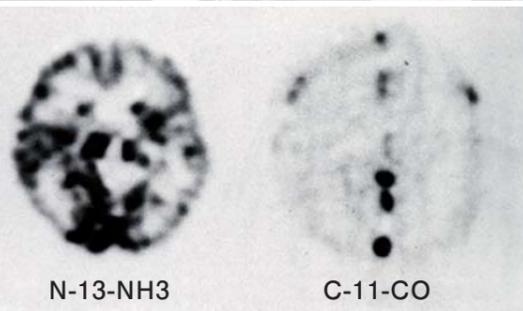
H.Murayama: Nucl. Instr. Meth.,177, pp.433-440, 1980.

図2: PET用BGO検出器とその信号処理回路



N.Nohara, et al: IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-27, pp.1128-1136, 1980.

図3: 頭部用PET装置 Positologica-IとそのPET画像



N-13-NH3

C-11-CO

子を分析し、信号処理によって大きな影響を受けるエネルギー分解能などの性能特性の成分を分離して評価することであった。具体的な研究目標は、それらの成分の原因となる因子を明確にした上で、成分の分離測定法を考案することであった。まず理論的解析によりエネルギー分解能の成分を明らかにし、それらが分離測定できる論理的根拠を示した。次に、シンチレータ内で生成する光子数の統計的変動に起因した統計的成分を分離測定するための具体的な方法として、光分配法と信号分割法の2つの手法を考案した。そして、実験によりそれらの測定法の妥当性を実証することに成功した(図1)。

この基礎研究を土台にして、核医学イメージング装置に利用されるシンチレーション検出器の特性を多面的に分析することができた。その分析手法によって、検出器の高性能化が図られただけでなく、新規シンチレータおよび新規受光器を採用した高性能PET用検出器の開発が、系統的に遂行できた。第一に、ゲルマニウム酸ビスマス(BGO)検出器について、エネルギーおよび時間特性を損なわずに計数率特性を向上する信号処理回路の設計を行った(図2)。その回路は、頭部用PET試作機Positologica-I用のBGO検出器に用いられた。Positologica-Iは国産初のPET装置であり、昭和54(1979)年に完成した(図3)。

次に、PET用のシンチレーション検出器として1次元位置コーディング方式を世界で初めて考案した。この方式を具体化した4連結BGO検出器は、昭和57(1982)年に完成した全身用PET試作機Positologica-IIに採用された(図4)。さらに、2個のBGOシンチレータに1個の受光器を光学結合したツインBGO検出器を開発した。これ

は、受光器としてグリッド付き光電子増倍管を用いることで、放射線を検知したシンチレータの弁別ができる検出器である。このツインBGO検出器は、富谷武浩さんが中心となって昭和59(1984)年に試作した小動物用PET装置Positologica-IVで使用され、当時としては世界最高性能の解像度である2.2mmを視野中心で達成した。

シンチレーション検出器に関する以上の研究成果は学位論文として集大成し、昭和58(1983)年に大阪大学より工学博士の称号を頂いた。昭和59(1984)年に、私はアメリカ合衆国ニューヨーク郊外のBrookhaven国立研究所に留学し、1年間滞在する機会を得た。渡米して間もなく、時間的余裕ができた私は1次元位置コーディング方式を拡張した2次元位置コーディング方式のPET用検出器を考案した。しかし、ほどなく米国の他の研究チームが先んじて研究を進めていたことを知り、非常に残念な思いをした。この無念な思いを経験したことが、後の放医研における次世代PET装置開発研究プロジェクトに取り組む執念となって活かされた、と今は思っている。

船出期(1986~1995年)

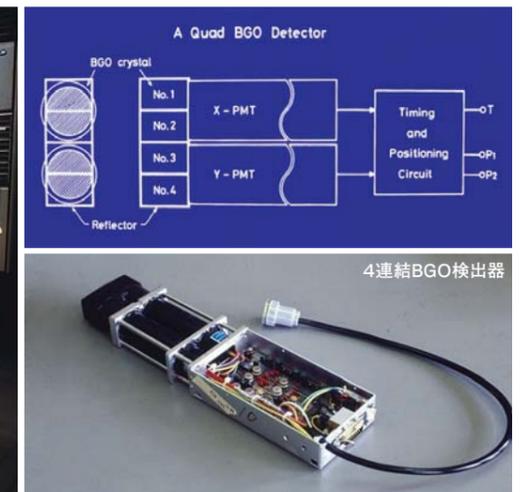
1980年代後半は、PET装置開発の主な担い手が放医研から企業へと移行する時期であった。それまで放医研を中心に培われた国産技術は、(株)日立メディコと浜松ホトニクス(株)で商品化を目指すPET装置に取り入れられるとともに、製品化に向けた技術改良や新たな技術開発がなされていった。一方、物理第1研究室では、私が放医研に入所する以前の1970年代前半に単光子放射断層撮影(SPECT)装置の試作を行っていたことから、SPECT装



放医研と日立メディコで共同研究開発

H.Murayama, et al: Nucl. Instr. Meth.,192, pp.501-511, 1982.  
K.Takami, et al: IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30, pp.734-738, 1982.

図4:4連結BGO検出器と全身用PET装置 Positologica-II



4連結BGO検出器

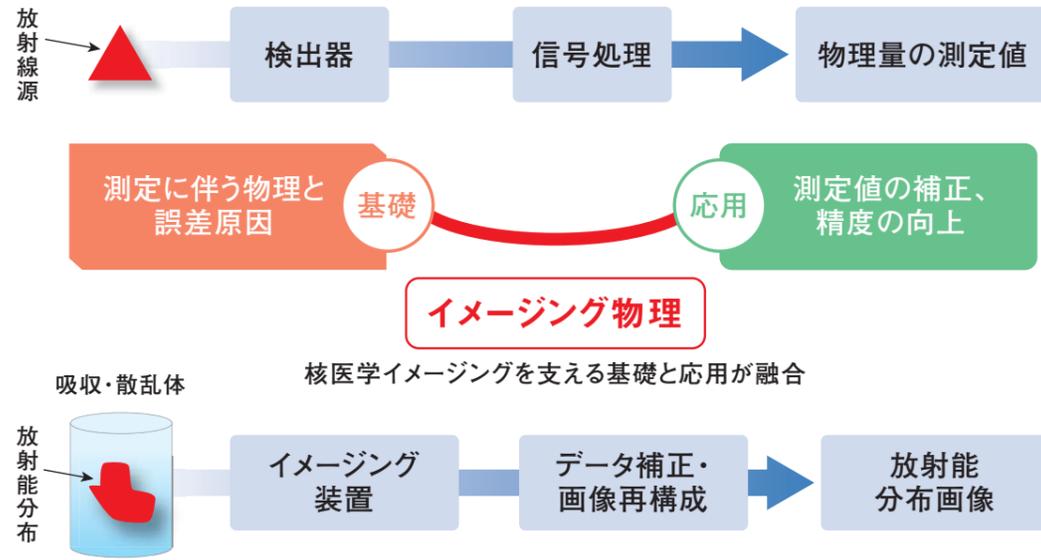


図5: イメージング物理の概念図

置の基礎研究にも着手していた。SPECTの画像を再構成する問題に取り組んだ田中栄一先生は、CT画像再構成法を独力で見出すことに成功した。その結果をまとめて原著論文として投稿したところ、査読者から先行研究があることを指摘され、大変悔しい思いをされたという。しかし、田中先生はめげることなく、その後も吸収体内の放射能分布を定量的に画像化するSPECT用の新しい画像再構成法の開発に挑戦していた。私は、昭和57(1982)年に都立老人研の外山比南子先生とともに、田中先生のSPECT画像再構成の研究に参加し、画像再構成法の重要性和奥深さを知ることができた。さらに昭和62(1987)年、野原功全先生が提案する中央部重点型SPECT装置の基礎研究にも協力した。これは、焦点距離の異なるファンビーム・コリメータを多数組み合わせることでSPECT画像の画質向上を図ることが目的であった。

検出器の研究は、基礎研究と応用研究の関係を深く理解することに役立った(図5)。一方、検出器の研究で成果を得た後にソフトの研究を経験したことにより、装置開発において画像再構成に関するソフトの研究が、検出器に関するハードの研究と相補的な関係にあり、両者は互いの進化を糧として力強く発展することを知った。さらに、検出器の特性と再構成画像の画質は種々の物理的要因に左右されることから、両者を融合すれば「イメージング物理」という新たな学問分野が形成できることを認識し、イメージング物理が核医学イメージングの進歩および核医学診断の

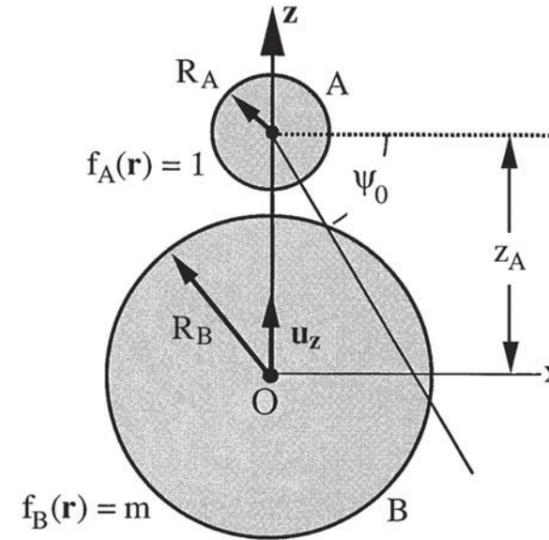
向上にとって重要な役割を担う分野であると自覚した。

1980年代後半はまた、日本の医療機器産業界にとって大変な苦難を強いられた時代であった(図6)。昭和63(1988)年に米下院で包括貿易法案が可決されたことを初めとして、日本は対米貿易黒字により、米国政府からしかるべき対応策をとるよう強く要請された。米国は次第に保護主義色を深め、日本たたきが横行する時代となった。漸く平成4(1992)年に、ブッシュ大統領と宮沢喜一首相は東京宣言により政治的決着を図ったが、その合意事項には、高額な米国製医療機器を日本が輸入することを奨励する旨の政策も含まれていた。その結果、日本の医療機器産業界は、機器開発および製造を基盤とする体質から商社体質へと変貌せざるを得ない状況に追い込まれた。



図6: 1980年代後半～1990年代前半の日米貿易摩擦に関する記事

3次元PETでは、2次元の場合と異なり投影データを選択する画像再構成が可能であり、画質改善につながる。

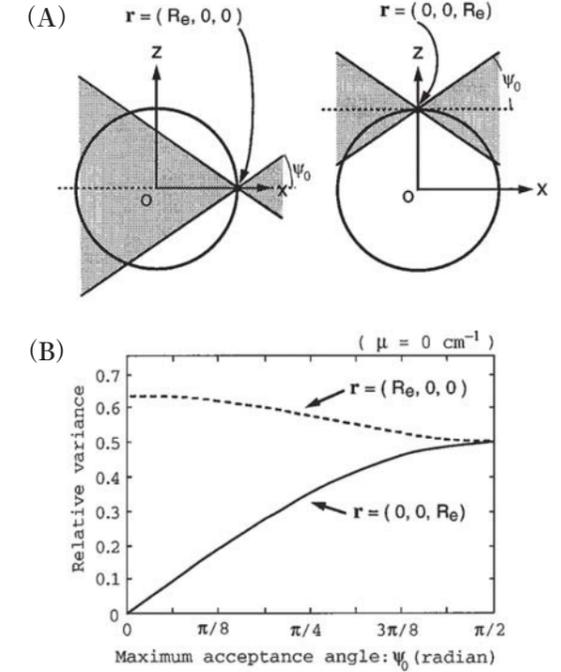


H. Murayama, et al: Phys. Med. Biol., 42, pp.231-249, 1997.

図7: 3次元PET再構成画像のノイズに関する研究

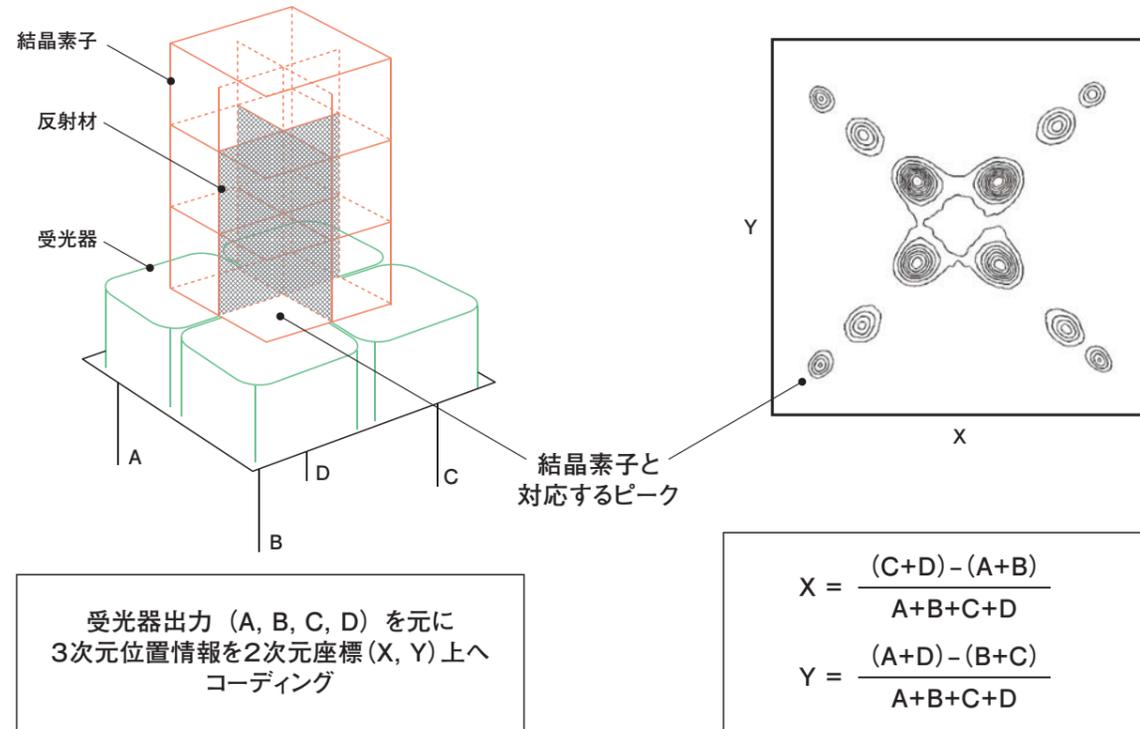
放医研でも、装置開発研究は難しい状況となってきた。これまで研究を指導してきた田中栄一先生が昭和63(1988)年に定年退職を迎え、平成6(1994)年には、物理第1研究室長に就任した山本幹男さんが、チーム研究の主体を気功の研究へと方向転換した。そこで、核医学イメージング装置開発研究を行うチームとしての活動は、放医研において一旦幕を閉じることになった。装置開発研究にまだ希望を抱いていた私にとって苦しい時期ではあったが、悲観的な気持ちに陥る暇はなかった。即座に自分の研究の方向をハードからソフトへ切り替えて、新たな視点を育てることに全力を集中した。この方向転換により、次の道が拓けたように思う。3次元画像再構成法の理論的研究に目覚めて分析を進めた結果、従来の見解に一部誤りがあり、PETの3次元再構成画像は2次元再構成画像と異なるノイズ特性をもつことを明らかにした(図7)。その理論的手法を土台にして装置特性を分析・評価することで、3次元PET装置がより高度な診断を目指す次世代の核医学イメージングに貢献し得ることを強く確信した。同時に、私が放医研内でPET装置開発研究を再開できる唯一の存在となったことを自覚した。

PET装置開発研究を再開するきっかけは、意外と早く到来した。平成7(1995)年に、これまで全く面識のなかった日立化成工業(株)の石橋浩之さんから、彼らの開発したケイ酸ガドリニウム(GSO)シンチレータをうまく利用できる検出器の具体案はないか、と相談を受けた。時期



尚早かとも思えたが、私の考案した新たな3次元位置コーディング方式をGSOシンチレータで試行してみることに決めた。その方式を実現するには、浜松ホトニクス(株)で開発中の位置感応型光電子増倍管を利用するのが良いと判断したので、浜松ホトニクス(株)の山下貴司さんに相談すると、快く研究協力を合意してくれた。さっそく石橋浩之さんが実験に必要なGSOシンチレータ結晶を用意し、浜松ホトニクス中央研究所でこれらの試行実験を行った。

図8は、試行した結晶ブロックの構成および実験結果の一例である。2行2列の結晶素子を2層に積み上げ、その上に溝を十字に入れた結晶板を重ねたもので、結晶素子間には反射材が適宜挿入された。結晶ブロックに4つの受光器を光学結合し、受光器出力を元に重心演算を行うことで3次元位置情報を2次元座標上へコーディングした。結晶ブロックにガンマ線を一樣照射すると、検出結果は2次元座標上に離散した計数ピークとして現れた。各計数ピークは結晶ブロックを構成するそれぞれの結晶素子に対応しており、3次元位置の同定が確認できた。この試行実験により、我々は3次元位置コーディング方式に自信を持ったが、予想より遥かに興味深いデータが得られたことから、効率的に開発を行うには相応の準備が不可欠であると判断した。さらなる要素技術の進展を継続しつつ、時期を見て本格的な装置開発研究に取り掛かることを決めた。図9はその時、開発研究の方向をはっきりさせるために描いた次世代PET装置開発計画の概念図である。



H. Murayama, et al: IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-45, pp.1152-1157, 1998.  
図8: 3次元位置コーディング方式の一例とその一様ガンマ線照射応答

### PET立体計測法の確立と機能画像定量性の向上

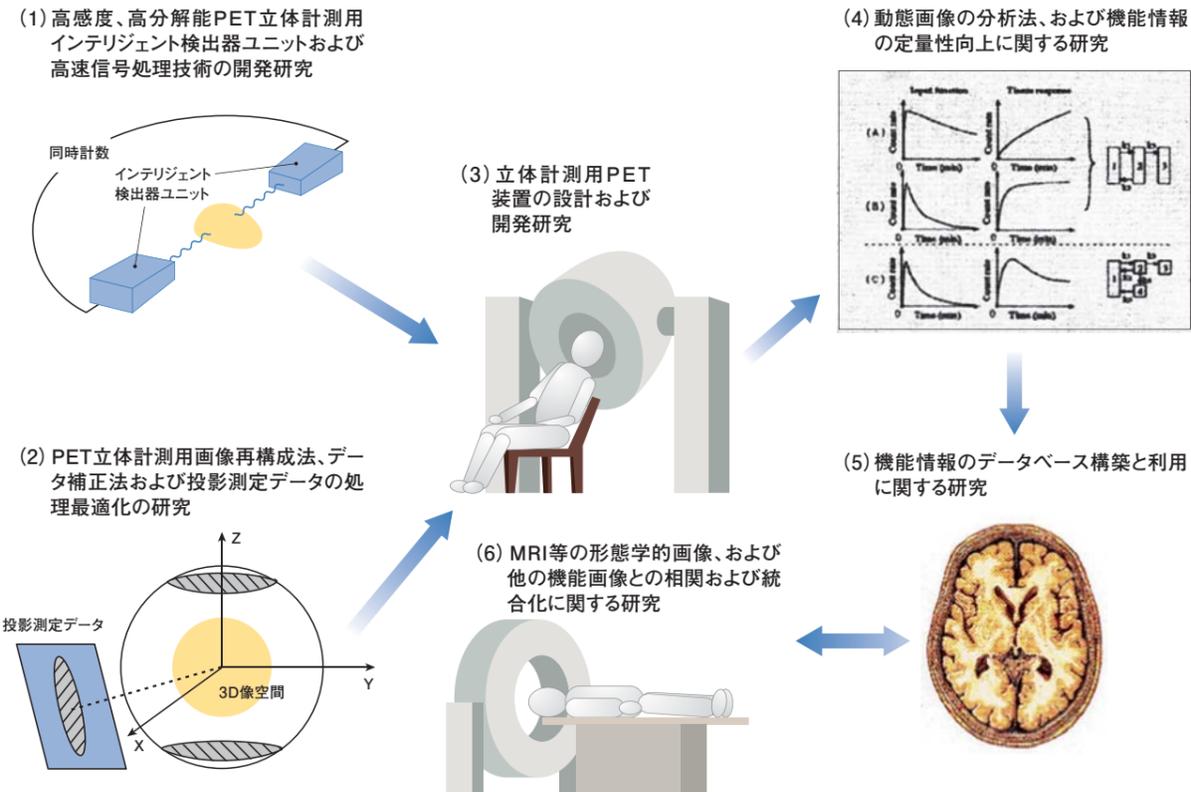


図9: 次世代PET装置開発計画の概念図 (1995年)

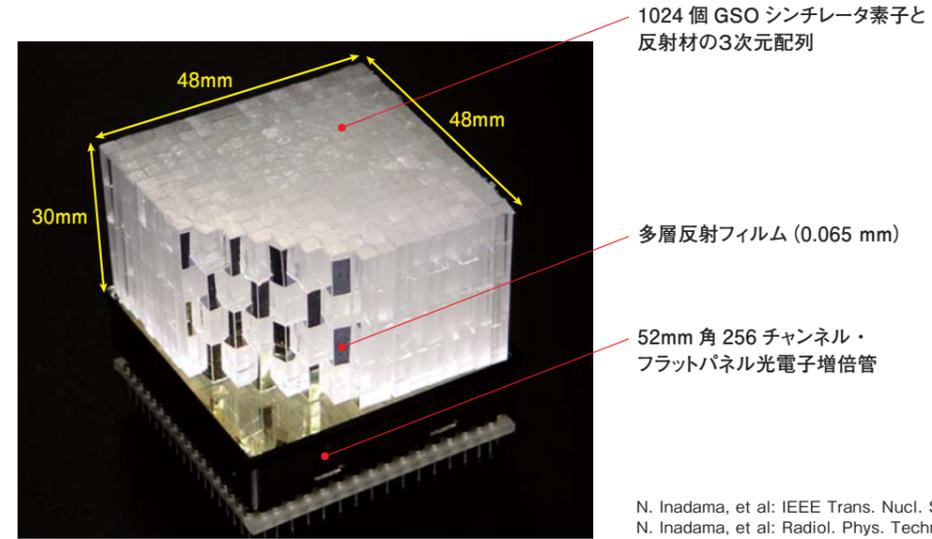


図10: 4層DOI検出器ユニットの構造

### 挑戦期 (1996~2005年)

その次の10年は、いままで欧米に対して遅れをとっていた装置開発研究を挽回し、世界に先駆けた高性能PET装置を研究開発すべく奮戦した時期であった。私は平成8(1996)年に、英国ロンドン市内のHammersmith病院MRCサイクロトロンユニットへ赴き、半年間滞在した。そこで世界最新の3次元PET試作機の搬入に立ち会い、その装置の物理的基礎特性を測定する機会に恵まれた。また、3次元PET装置開発に関する世界の動向について調査をしたが、最新情報の集まる英国はそのための最適な場所であった。その結果、装置開発研究を日本で再開しても挽回は可能であり、まだ遅くはないという結論を得ることができた。

帰国後、私は山本幹男室長の研究室を去り、高度診断機能研究ステーション(棚田修二部長)で放射性薬剤の開発研究を担当する鈴木和年研究室に移動した。そこで、新たな3次元PET用検出器として、3次元位置コーディング方式を採用したDOI (Depth of Interaction、深さ位置情報) 検出器の基礎研究を本格的に再開した。我々の提案するDOI技術は光分配方式とも名付けられるもので、3次元的な光の制御のみで3次元配列結晶の3次元位置コーディングを行う。その簡素なコーディング原理がこの方式の最大の特徴であり、成功すれば波及効果は大きいと予想された。また、放医研外部の方との研究協力を促進するために立体計測研究班を組織し、次世代PET装置開発に向けた体制づくりの準備を進めた。

平成12(2000)年には、放医研で新規にPET装置開発研究プロジェクトを行うことが決定したため立体計測研

究班を終了し、新たに次世代PET装置開発研究班を立ち上げてプロジェクトの準備に取り掛かった。放医研内には装置開発を担当する研究者集団がもはや存在していなかったため、装置開発を全く知らない新人の発掘と教育が不可欠であった。近隣の千葉大、東工大、東大、北里大など多くの大学が参加し、(株)島津製作所からも協力を得ることができたことで、放医研を中心とするオールジャパンの体制が整った。さらに要素技術ごとに小グループを形成し、グループごとの連携を円滑にするため年に2回次世代PET研究会を開催して、研究の進捗を報告しあうことで、装置開発全体の課題点を皆で共有することにした。

平成13(2001)年にプロジェクトが本格的に始動したことに伴い、私は医学物理部(遠藤真広部長)に移動し、診断システム開発室長に就任した。開発する次世代PET装置を人体頭部用とし、その装置性能目標を明確にすることで開発の方向を定めて、研究すべき項目の重点化を行った。最重要の要素技術であるDOI検出器を実現するには、高性能のシンチレータおよび新規受光器の技術開発と、それらを組み合わせる技能の壁に挑戦することが不可欠であった。以上の問題の克服にあたって、高品質GSOシンチレータと新開発256chフラットパネル光電子増倍管(FP-PMT)がともに国産であることは、大きな意義があった。直接メーカーと相談することが可能なため、効率よく技術を向上していくことができた。

高品質GSOシンチレータとFP-PMTの量産化に成功し、平成15(2003)年に我々は1024個の小型シンチレータ素子の3次元配列からなる結晶ブロックに256ch FP-PMTを光学結合する4層DOI検出器の開発に成功した(図10)。

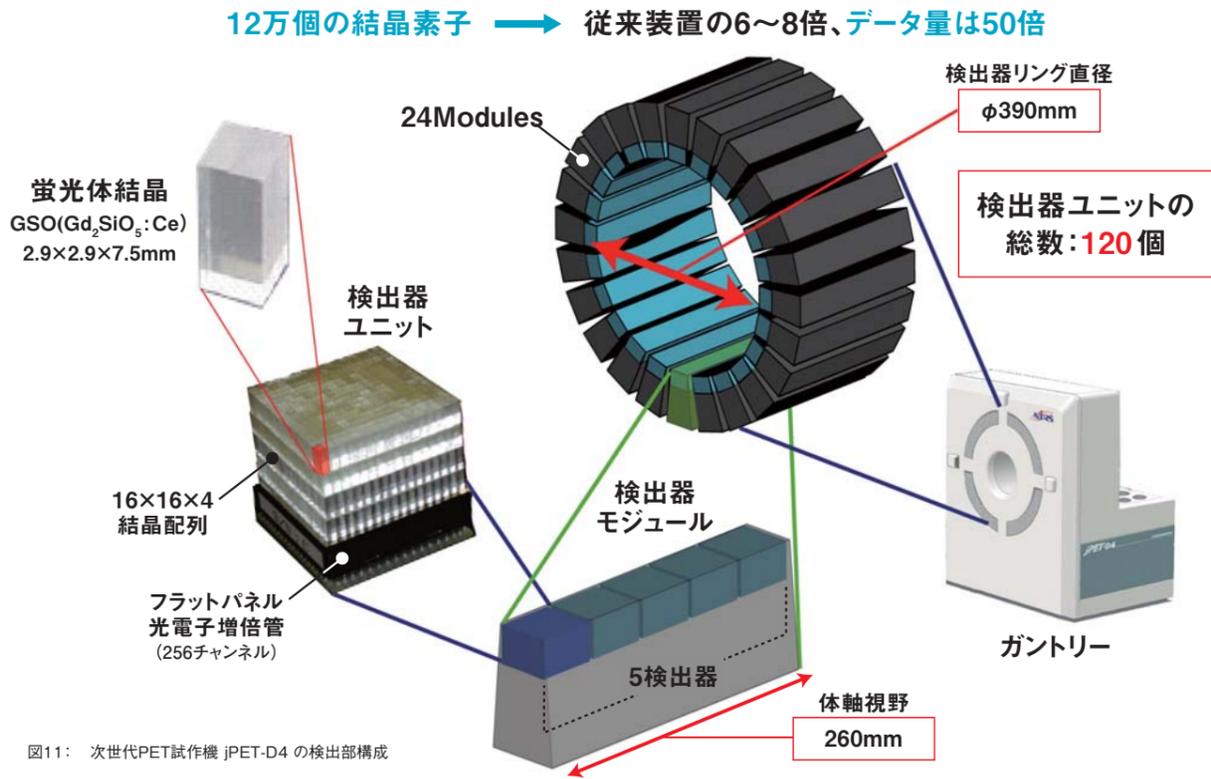
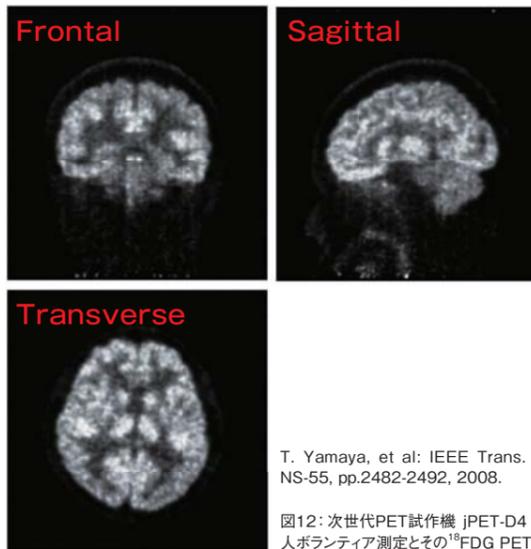


図11: 次世代PET試作機 jPET-D4 の検出器構成



結晶ブロックの製造には、小型シンチレータ素子間に薄い多層反射フィルムをまばらに挿入する必要があったが、その製造を容易に行うための手作業において、特殊な技術をもつ小企業（株）篠崎製作所、（株）三幸と共同して開発した薄膜フィルム加工法や治具が大いに活躍した。また、装置全体で122,880個に及ぶ膨大な検出素子をガンマ線の一様照射により自動弁別する手法も開発できたので、平成16（2004）年には品質の揃った4層DOI検出器ユニットを

120個量産する作業に着手した。翌年8月に検出器ユニットの製造が完了し、試作装置「jPET-D4」のガントリーに実装して物理特性の評価を行い、DOIの効果を実証した。図11は、jPET-D4の検出器部の展開図である。そして、12月に健康人ボランティアの<sup>18</sup>F-FDG測定を試行し、従来の商用PET装置では不可能な高感度・高解像度の<sup>18</sup>F-FDG-PET画像を得ることに成功した（図12）。

次世代PET装置開発研究プロジェクトを5年間統括す

る経験を通して、私はイメージング物理の役割を再認識した。研究プロジェクトにおいては、基礎研究を応用研究へと展開させることが重要な視点であり、これがイメージング物理の要である。しかし、装置開発を目指すプロジェクトでは、それだけでは不十分であり、基礎分野を系統的に研究し真理を究めようとする科学と、現状で利用できる最先端の技術との擦り合わせを的確に行うことが一層重要である。また、実際の装置試作によって装置性能の潜在力が見直されると、関連する基礎研究と応用研究が共に刺激を受けて、それぞれの分担する新たな目標が明確になる。それと同時に、科学と技術を擦り合わせる実用総合科学としての視点から、さらなる性能向上を目指す次の装置開発研究プロジェクトが効率良く立案できるようになる。イメージング物理は、実用総合科学の具体的な問題に取り組むことで一層の体系化がなされ、研究者および技術者の視野を広げることに貢献するだろう。



写真2: 次世代PET研究会（2006年1月19日、法政大学ボアソナードタワー）

### 展開期（2006～2009年）

核医学イメージング装置開発研究チームは、放医研内で終焉するかに見えた時期もあったが、次世代PET装置開発研究プロジェクトに参加した若い研究者達によって、その灯は受け継がれた。彼らは、装置開発研究の世界的潮流への復帰を果たしたつわものであり、自信と意欲に満ちている。平成18（2006）年からは、世界をリードする新たな研究目標を掲げ、分子イメージング研究センター・先端生体計測研究グループ内のイメージング物理研究チームを拠点に、さらなる挑戦へと歩みを進めている。イメージング物理研究チームの活動は、放医研内における研究者間の協力に留まらない。大学・企業・他の研究機関などと組織を超えた研究協力体制が形成されるようになった。平成18（2006）年に放医研・東大との共同研究の下に（株）島津



写真3: 次世代PET研究報告書（平成12年度～20年度）

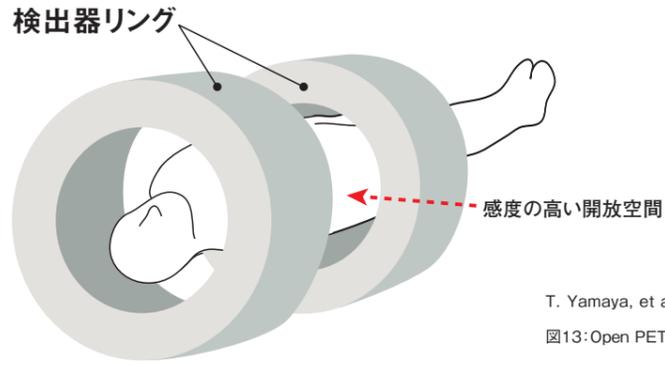
製作所を中心とする新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）のプロジェクトが認められ、放医研で開発されたDOI検出器を用いた乳がん検査用PET装置の実用化が図られようとしている。

写真2は、平成18（2006）年1月19日に、東京・市谷の法政大学ボアソナードタワーで開催された次世代PET研究会における佐々木康人放医研理事長の開会挨拶の風景である。全参加者213名のうち、放医研外からの参加者は193名であった。プロジェクトが当初の目標以上の成果を達成できたのは、次世代PET研究会の持続的活動によるところが大きかったといえる。写真3は、毎年3月に放医研で発行してきた各年度の「次世代PET研究報告書」である。この報告書から研究会の活動の様子を知ることができるだろう。その電子ファイルは、放医研のホームページにある以下のアドレスで参照できる。

<http://www.nirs.go.jp/usr/medical-imaging/ja/study/main.html>

本研究会は、次世代PET装置開発研究プロジェクトを円滑に進めるために10年前設立されたものだが、今ではPETの要素技術を研究開発する国内の研究者・技術者が組織を超えて情報交換を行い、互いに研究効率の促進を図る役割も果たすようになった。その現れの一つとして、本研究会をきっかけに東北大・東工大・東大の研究者が企業（古河機械金属（株））と連携し、平成20（2008）年に新たな要素技術の研究開発を行うNEDOプロジェクトが始動した。

また、放医研においても平成20（2008）年に、さらなる発展が見込まれるPET装置の方式として、測定対象部位の両側にリング状のDOI検出器を配置するOpen PETを提案し、その実現可能性を示した（図13）。Open PETは、中央の解放空間で最も感度が高くなる点に特徴がある。そ



T. Yamaya, et al: Phys. Med. Biol., 53, pp.757-773, 2008.

図13: Open PET の概念図

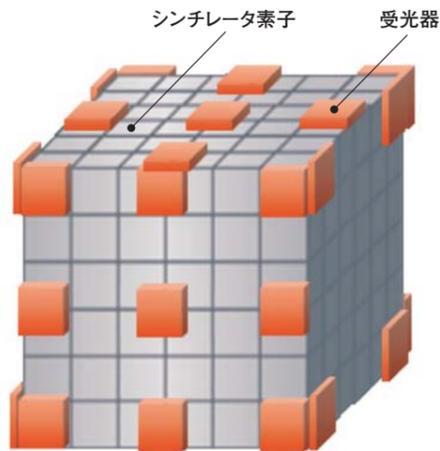


図14: 検出器 X'tal Cube の概念図

受光器として半導体のガイガーモード APD (MPPC) を用いることにより、用途に応じた自由な検出器配置が可能な高性能 DOI 検出器の実現を期待できる。

#### 放医研と浜松ホトニクスとの共同研究

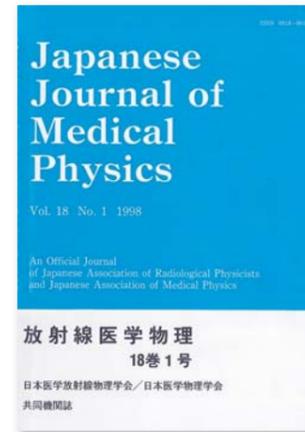
Y. Yazaki, et al: The 5th Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics, Sept 10-12, 2008, Jeju, Korea, YI-R2-3, 2008.

の空間に、他の診断機器や治療装置を挿入できるので、新たな PET の活用法を切り拓くと期待される。そして、より高度な DOI 検出器技術として、X'tal Cube 検出器を提案した(図14)。X'tal Cube 検出器は、シンチレータ素子を3次元配列した結晶ブロックの表面に半導体受光器のガイガーモード APD (MPPC) を光学結合させた構造で、放射線の検出位置、エネルギー、時間情報を高精度に得られると期待される。X'tal Cube 検出器の実用化により、乳がん検査用 PET 装置のような部位別装置の性能が向上するだけでなく、Open PET を具現化する際の検出器配置方式に自由度が増し性能も向上するため、Open PET の臨床応用を加速するだろう。今年4月より就任した山谷泰賀イメージング物理研究チームリーダーを中心とする若手研究者の今後の活躍に期待したい。

放医研での研究活動と並行して、私は放射線に関わる様々な社会活動を行ってきた。学会での活動において特に思い出が深いのは、日本医学物理学会(JSMP)と日本放射線技術学会(JSRT)とが共同事業として立ち上げた英文

専門誌「Radiological Physics and Technology」の出版である(図15)。土井邦雄シカゴ大学教授を編集委員長として、2008年1月に創刊号を約2万部出版したが、そこに至るまでには、両学会の熱意ある担当者の活動をもってしても5年間の準備が必要であった。私は、1998年から2007年までの9年間、JSMPの機関誌「放射線医学物理」および「医学物理」の編集委員長を務めてきたが、英文専門機関誌の創刊は最難関の課題であった。2000年に当時放医研の所長を務められていた佐々木康人先生に「新生医学物理」というテーマで原稿のお願いをしたことがあった。所長室を訪れてその依頼原稿を受け取った際、佐々木先生は私にJSMPとJSRTが協力して前向きに活動すれば放射線医学の発展に大きな貢献をするだろうと激励された。その励ましの言葉を支えに、当時JSRT担当理事の真田茂(金沢大学)さん、JSRT会長の藤田透(京都大学)さん、JSMP会長の遠藤真広(放医研)さん達と地道な努力を重ねて、長年の懸案であった英文専門誌の共同出版が実現できたと思っている。

「放射線医学物理」(～1999年)  
「医学物理」(2000年～)



日本放射線技術学会と  
英文誌を共同出版  
(準備に5年)

「Radiological Physics and Technology」  
(2007年～)

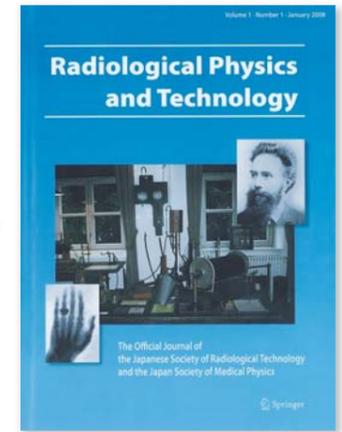


図15: 日本医学物理学会の機関誌と2年前に創刊した英文誌

#### 国研の研究者魂

今から52年前の昭和32(1957)年に放医研は設立されており、研究公務員として私が放医研に入所したのは、創立からほぼ20年を経た時であった(図16)。放医研が設立されたきっかけは、昭和29(1954)年に起きた第五福竜丸ビキニ原爆事件であり、マグロ漁で操業中の漁師の方が被ばくし、死亡者が出たことに端を発する。この事件により日本政府は、放射線の人体に対する影響、防護の研究を国として行うと同時に、放射線に関する知識や技術を国内に普及させて、国民の安心と安全を確保する必要性を強く認識した。当時、このような政府の要請に応えるべく新たな試験研究機関の設立に名乗りを上げたのは、厚生省、文部省、通商産業省の3省であったと聞く。しかし、3省が個別に研究所を作るのは無駄であると判断されたことから、まだ創立間もない科学技術庁の下に一元化して放医研を設立することが決められた。その設立目的は、以下の3つである。

- 1)放射線による人体の障害ならびにその予防診断および治療に関する研究
- 2)放射線の医学利用に関する研究
- 3)上の1)および2)に関する放射線技術者の養成と訓練

科学技術庁は出来立ての組織であったため研究を担う人材は皆無であり、文部省、厚生省、通商産業省の3省から人材は供給された。たとえば、私が入所時に所属した物理研究部物理第1研究室は通商産業省が母体であり、田中栄一先生は、電気試験所標準器部放射線課から移籍した。電気試験所はその後、昭和45(1970)年に名称を電子技術総合研究所と変え、平成14(2001)年の独立行政法人化の際には、産業技術総合研究所に統合された。

一方、過去に遡ると電気試験所はそもそも碍子試験所であったのが、明治24(1891)年に名称変更した試験研究機関であった。実はこの碍子試験所こそが、国研のはじまりであり、設立は明治9(1876)年であった。開国したばかりの日本政府は、富国に必須となるエネルギー源を確保するために、山地の多い日本に好都合の水力発電に着目した。当時、発電設備やダム建設のための技術は既に外国にあった。しかし、絶縁技術は貧弱であった。山地のダムで発電した電気が電線を伝って海岸の工場地帯まで効率よく電送されるには、絶縁技術が不可欠である。幸いにも絶縁物に適する陶磁器の技術は、古来より日本で育まれてきた歴史があった。そこで、湿気の多い日本に適した絶縁技術を研究開発するために、碍子試験所が設立されたのである。私は、所属した研究室がそのような系譜の下にあることを誇りに思っており、国研の研究を担ってきた先達に恥じない仕事をするべく心がけてきた。放医研の研究者には、明治人の気概が源泉にある「国研の研究者魂」を是非受け継いでほしいと願っている。

放医研は独法となったが、その研究目的が国研に比べて大きく変化したと私は考えていない。確かに独法化した以上、日本にとって必要な科学技術を自ら選択し、研究する力量が国研時代以上に放医研には求められている。しかし、放医研のこれまでの業績と放医研に対する国民からの熱い期待を踏まえるならば、設立時の目的を再認識して、放射線に関わる研究を中心に地に着いた活動を進めるのが賢明であり、特色と実りある成果が期待できる。今後も、多くの専門分野の研究者・技術者が、放医研に相応しい大目標を共有することで総合力を発揮し、成果を上げる道を切り拓いてほしい。

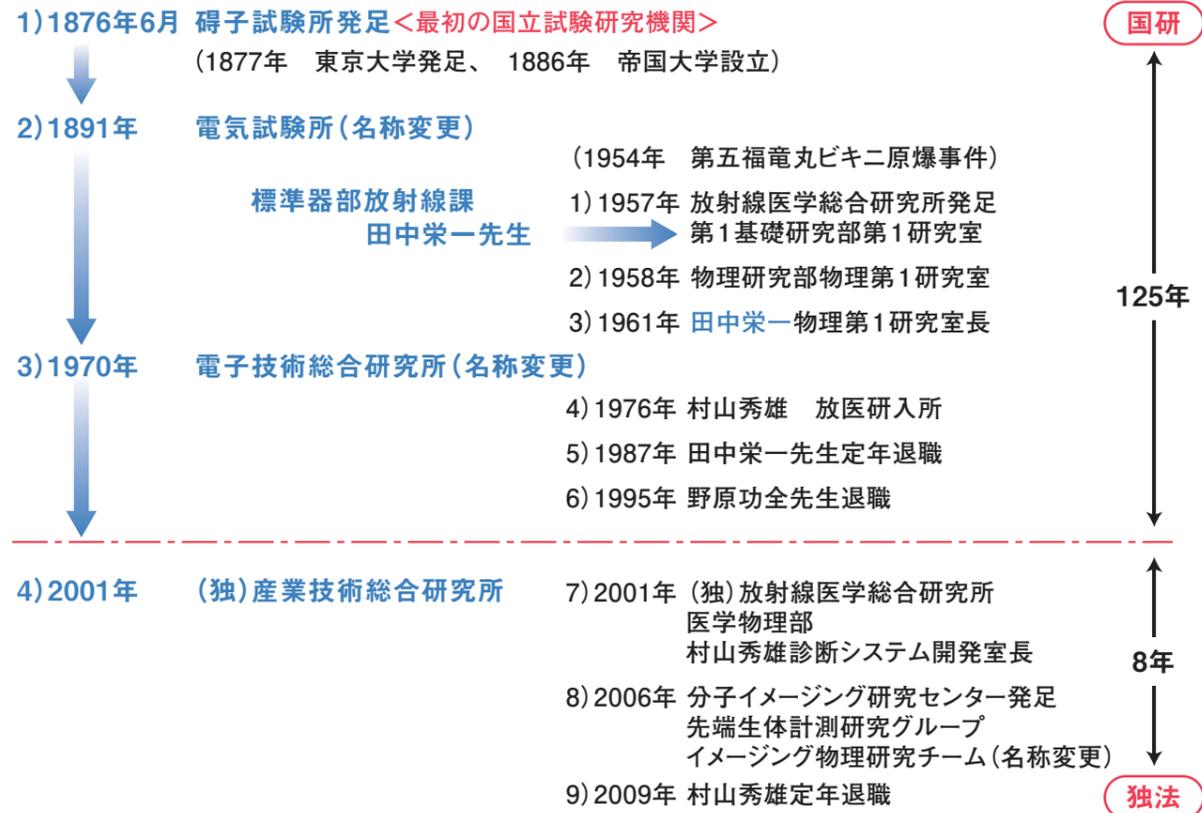


図16: 最初の国立試験研究機関と放医研のつながり

**おわりに**

写真4は、今年3月24日の退職者講演会において、講演を終えた直後に花束を贈られた私である。その笑顔には、33年間にわたる職責を果たし終えたという喜びが表れているように思う。私にとって、このような研究生活最良とも言えるべき日を迎えることが出来たのは、多くの方の尽力によるものである。放医研内の研究者、技術者、事務職員の方に留まらず、他の研究機関、大学、企業のさまざまな分野の方に育てて頂き、惜しみない援助をして頂いたことに篤くお礼申し上げます。特に、次世代PET装置開発研究プロジェクトの推進中に自ら参加した学生・院生の諸君は、未踏の分野に果敢に挑戦し、大きな力を発揮してくれた。その経験は必ずや、それぞれの持ち場で自分を鍛え育てるための原石になると確信している。

これまでの私の研究生活を総括すると、以下の4つの基点に帰着する。

- (1) 進む道が暗いときは、自分を鍛える良い機会になった。
- (2) 進むべき道を選択するときは、一旦体を楽にした後、直感を頼りに決断するのが良かった。

- (3) 進む道が明るいときは、傲慢にならないようもっと心がけるべきであった。
  - (4) 年齢、性別を問わず、同じ目標に向う仲間を大切に、楽しみと苦しみは仲間同士で分かち合うことで次の道が切り開けた。
- 以上に述べた研究遂行に関する私の回想が、研究という仕事によって世に役立つことを志す後輩に、何らかの励みとなれば幸いである。



写真4: 退職者講演会(2009年3月24日)にて

**公開講座のお知らせ**

放射線医学総合研究所  
第15回公開講座  
「放射線・人の心・重粒子線がん治療を知る」

放射線医学総合研究所は、放射線による人体への影響と医学利用に関する研究開発を総合的に行う国内唯一の研究機関として、幅広い研究開発を行っています。今回の公開講座では、私達の身近で医療などに使われている放射線の健康影響と、最近の研究成果として国内外のマ

スコミに大きく取り上げられ関心を集めました“ねたみの脳科学”についてわかりやすく解説いたします。また、人に優しいがん治療として注目を浴びております当所の重粒子線がん治療について、今回は頭頸部腫瘍を中心に、その治療成績などを詳しくご紹介いたします。



※写真はイメージです。

**プログラム**

13:00~	開場
13:30~13:35	開会挨拶 米倉 義晴 放射線医学総合研究所理事長
13:35~13:55	放医研の研究紹介 原田 良信 企画部広報課課長
13:55~14:40	「放射線と健康影響—東海村JCO臨界事故を振り返る—」 蜂谷みさを 緊急被ばく医療研究センター 被ばく医療部主任研究員
14:40~15:25	「ねたみの脳科学—他人の不幸を喜ぶ気持ちがどうやって生まれるか?—」 高橋英彦 分子イメージング研究センター 分子神経イメージング研究グループ 主任研究員
15:25~15:45	コーヒーブレイク
15:45~16:30	「重粒子がん治療—頭頸部腫瘍を中心として—」 神宮 啓一 重粒子医学センター病院治療課 医師
16:30~16:40	閉会挨拶

放射線医学総合研究所  
第15回公開講座  
「放射線・人の心・重粒子線がん治療を知る」

日時：2009年9月11日(金)13:00~16:40  
場所：放射線医学総合研究所 重粒子治療推進棟2階大会議室  
定員：140名  
費用：入場無料。ただし事前に申し込みが必要となります。  
事前申し込み：http://www.nirs.go.jp/news/event/2009/09\_11.shtml  
または、広報課に直接お申し込み下さい。

放射線医学総合研究所 広報課 : Tel. 043-206-3026 Fax. 043-206-4062 E-mail:kouza@nirs.go.jp

## シアトルで集めたペーパーバック 市川龍資

片岡義男さんという作家が岩波書店のPR誌「図書」の最近のものにアメリカのペーパーバックについてご自分の蒐集経験談を連載しておられる。十三歳の頃から買い始めた片岡さんは今は七千冊も持っているそうである。ぼくが持っているアメリカのペーパーバックは20冊くらいなので、天と地との違いがある。片岡さんは父親が太平洋戦争終結直後のマッカーサー連合軍総司令部の民政局に勤めておられ、その関係で米国のペーパーバックが自宅の部屋に多数積み上げられていたことが片岡さんを刺激してその後の長い人生においてこれらを蒐集する動機になっているとのことである。

ペーパーバックというのは、わが国でいう文庫本のことである。岩波文庫よりやや背が高い。アメリカではペーパーバックと呼び、厚い表紙の立派な本つまりハードカバーの出版物の代りにその廉価普及版として軟かい紙の表紙でつくられたものである。

ぼくは米国シアトルに滞在していた時、大学通りにあった大きな本屋によく本を見に行き、このペーパーバックの表紙絵に惹かれていくつか買った。この書店には立ち読みしなくても腰掛けて読めるように椅子がいくつも置いてあった。暖炉のそばにはコーヒーが湧いていて自由に飲むことができた。無料だった。

エリック・マリア・レアルク（有名な小説「凱旋門」の作者）の「愛する時と死する時」(A time to love and a time to die)と題するペーパーバックもここで買い、さらに大学通りの映画館でこのカラー映画を見た。ドイツ兵グレーバーは結婚して間もなく愛妻を残して敗色濃い戦線に行った。彼の心の優しさ故に人を信じ人を救い、そしてそのために自らが撃たれて死ぬ。赤ちゃんの生れたことを知らせる妻からの手紙を握ったまま、小川のほとりに倒れ、手紙は水面に落ちる。彼の伸した手は届かず、手紙はゆっくりと流れてゆく。このラストシーンの哀切さが見ている人の心に滲みる。

ほかに、テネシー・ウィリアムズという一時代前の日本で使われた表現を用いれば大衆小説作家と言える人の作品である「熱いタン屋根の上の猫」(Cat on a hot tin

roof)や、「欲望という名の電車」(a street car named desire)なども買い、映画も見た。

また、ジョン・スタインベックの「エデンの東」(East of eden)、マーガレット・ミッチェル「風と共に去りぬ」(Gone with the wind)も表紙絵が気に入って買った。

これらのペーパーバックの特徴は表紙絵が優れていることである。「風と共に去りぬ」の表紙絵は、レッド・バトラーが倒れているスカーレット・オハラを抱き上げている姿が描かれており、「エデンの東」には粗末な衣服をまとった美しい女性が描かれている。こういう表紙絵は1950年代ないし60年代のものに限られている。この年代のアメリカのペーパーバックの表紙絵は、片岡さんの文章を引用すると、「ペーパーバックの表紙絵は十把ひとからげにされて煽情的だとしばしば言われた。主として男女間の劇的な場面が典型的に誇張されて描かれているという。幼稚であるなどと指摘されることがあった。…」と述べられている。

「エデンの東」は日本でも上映されて有名になった。一つは主人公を演じたジェームス・ディーンという青年俳優が人気を集めたこと、この映画のバックミュージックが日本人の感情によく合っていたことによるようである。ジェームス・ディーンは、若くして自動車事故により壁に激突するという衝撃的な事件で世を去ったことも人々の悲しみと同情を呼んだことも関係している。この「エデンの東」の表紙絵もぼくは気に入っていた。父からも、母からもそして兄からも疎まれて、ひとり孤独だった主人公キャル(ジェームス・ディーン)が戦死した兄の婚約者アブラの愛情によって救われるという物語なので、表紙絵の女性はおそらくこのアブラを描いたものと推測される。

こういう1950年代のペーパーバックを片岡さんは今でも神保町を歩き、探し出してくることに成功しているとのことである。羨しい限りである。

ICHIKAWA RYUSHI (元放医研科学研究所)



本部棟の中庭に緑のカーテンの役割を担って植えられているゴーヤ(ツルレイシ: 蔓荔枝)

## 編集後記

1609年、イタリアの天文学者ガリレオ・ガリレイが自作の望遠鏡を用いて世界で初めて天体観測を行いました。それから400年、たくさんの方が天体望遠鏡で夜空を観察し、そして様々な発見をしてきました。今では望遠鏡もずいぶん進化し、可視光だけでなく、赤外、電波、X線などを利用した望遠鏡も活躍しています。天体望遠鏡の用途もずいぶん幅広くなったように思います。今月号では、光学望遠鏡を用いた地球外文明の探索について、最近の成果を執筆していただきました。地球外文明と聞くだけでなんだかワクワクしてきます。皆様の中にも、SETI@homeに参加された方がいらっしゃるのではないのでしょうか。

もう一つの最近の成果では、試料内部に発生した活性酸素の可視化について執筆していただきました。見えなかったものを見るためのアイデアと工夫が伝わってきます。2編の最近の成果から、「見る」ことの大切さを感じられます。

400年と比較すると33年は短いかもしれませんが、しかしながら、一人の人生において様々な喜びや苦勞の体験が詰まった、かけがえのない大切な時間です。そして、我々在职者は、その歴史から学ぶことがたくさんあります。責務を果たしたとき、先生の様な笑顔でありたいと思います。(IN)

## 次号予告

**特集** 放医研第15回公開講座  
-放射線・人の心・重粒子線がん治療を知る-

**最近のトピック** 論文引用動向からみる  
近赤外脳機能イメージング研究のエポック  
食品総合研究所 食認知科学ユニット  
檀 一平太

**印象記** 弘前大学大学院保健学研究科  
第1回緊急被ばく医療国際シンポジウム  
-放射線基礎研究から緊急被ばく医療まで-  
緊急被ばく医療研究センター 被ばく医療評価部  
立崎 英夫

### 《編集委員会》

委員長	酒井 一夫		
委員	内堀 幸夫	小橋 元	立崎 英夫
	白川 芳幸	菊池 達矢	鈴木 敏和
	高田 真志	長谷川純崇	杉森 裕樹
	玉手 和彦	神田 玲子	
	金澤 光隆	石井 伸昌	
事務局	岡本 正則		

## 放射線科学

第52巻 第8号

2009年8月15日発行

### 《編集・発行》

独立行政法人 放射線医学総合研究所  
〒263-8555 千葉県稲毛区穴川4-9-1  
電話 043(206) 3026 Fax.043(206) 4062 Eメール info@nirs.go.jp  
本誌 URL:http://www.nirs.go.jp/info/report/rs-sci/index.shtml  
(禁無断転載)



<http://www.nirs.go.jp>