

長聴第20 - 2号

長計についてご意見を聴く会(第20回)
平成17年1月21日

放射線の医学利用の現状と課題

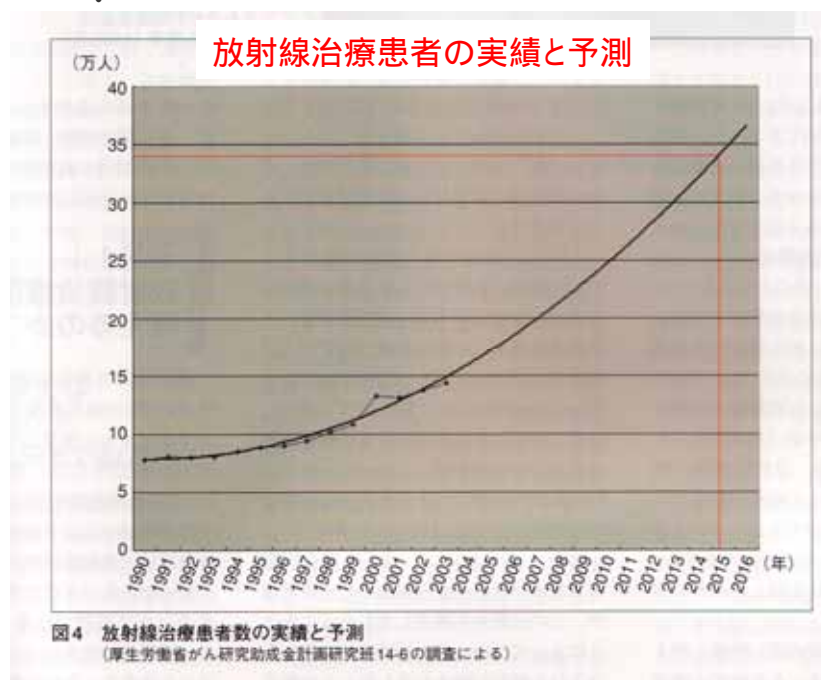
独立行政法人放射線医学総合研究所



内 容		(頁)
1.	わが国の放射線治療の現状と課題	: 3 ~ 5
2.	重粒子線がん治療の進展と今後の課題	: 6 ~ 9
3.	放射線診断の現状と医療被ばくの最適化	: 10 ~ 13
4.	PET(陽電子放射断層撮像法)を中心 とした分子イメージング研究の展開	: 14 ~ 20
5.	緊急被ばく医療に関する研究	: 21 ~ 22
6.	放射線影響・防護研究	: 23 ~ 25

わが国の放射線治療の現状

1. わが国のがん患者数は年間52万人で、そのうち約14万人(2003年)が放射線治療を受けている。この数は今後も増え続け、2015年には34万人が放射線治療を受けると予測されている。

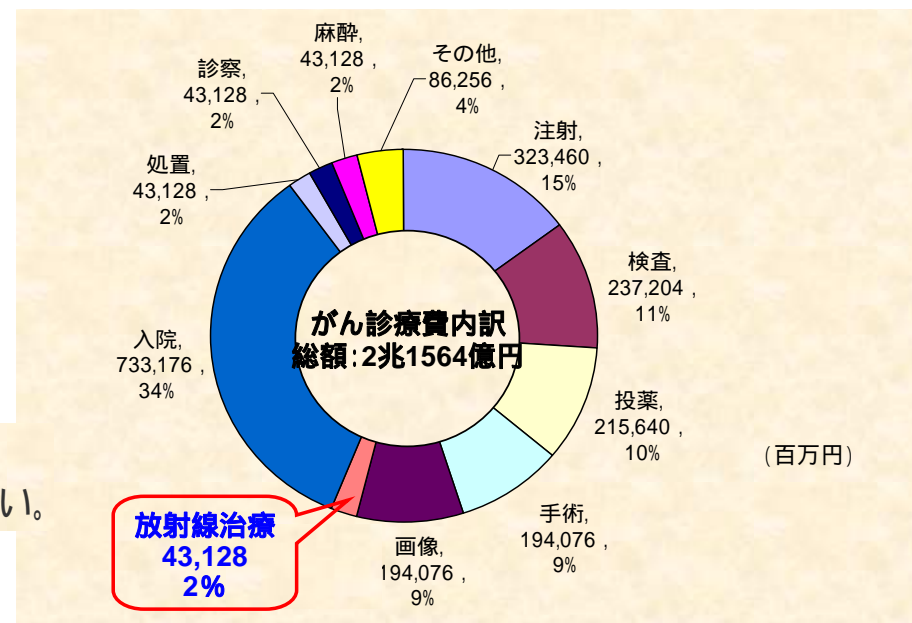


2. 国民一般医療費24兆円のうちがん診療は約2兆円(9%)で、放射線治療はそのうちの僅か2%に過ぎない。

3. 放射線治療環境の現状

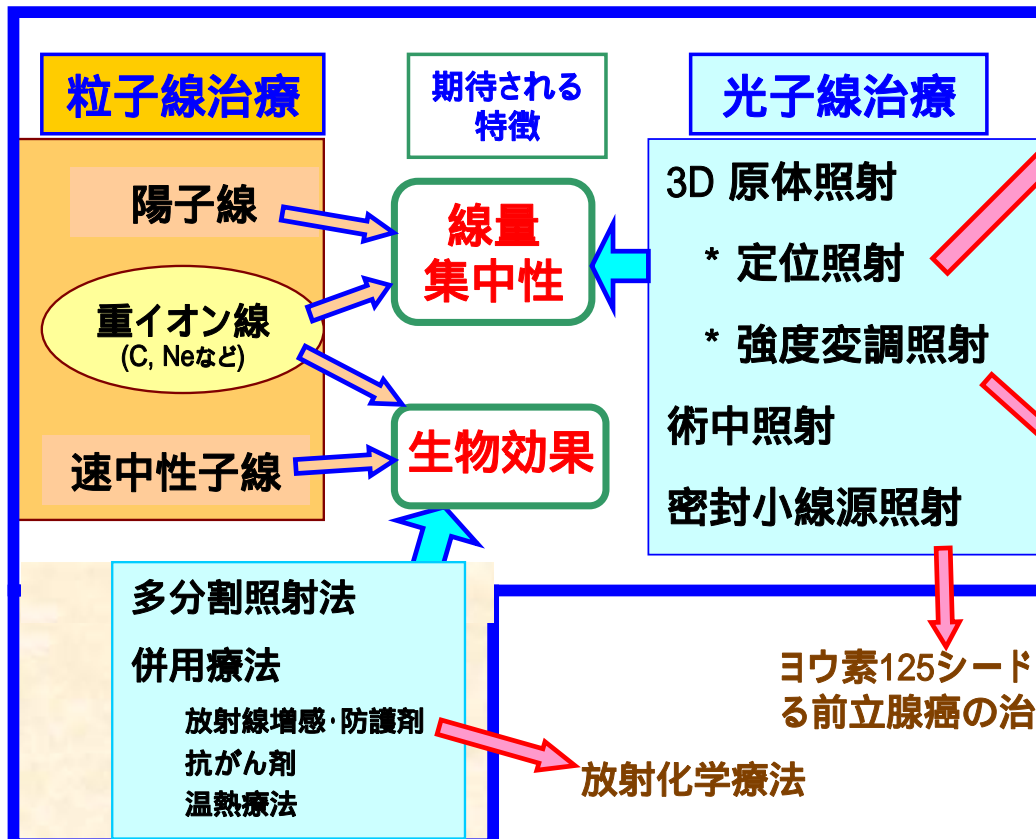
放射線治療環境の日米比較

	日本	米国
放射線治療医	500人	2300人
医学物理士	40人	4000人
治療技師	1000人	多数
施設数	700	1400
治療装置(Linac)	800	1900
新患者数	13万人	60万人



がん放射線治療における線量集中照射法の進歩

新患者数(施設数)	リアック	コバルト	ガンマナイフ	粒子線	高線量率
					RALS
< 100 (209)	182	26	3	1	15
100-299 (375)	373	11	20	1	84
≥300 (142)	218	5	17	4	104
Total (726)	773	42	40	6	203



定位放射線治療

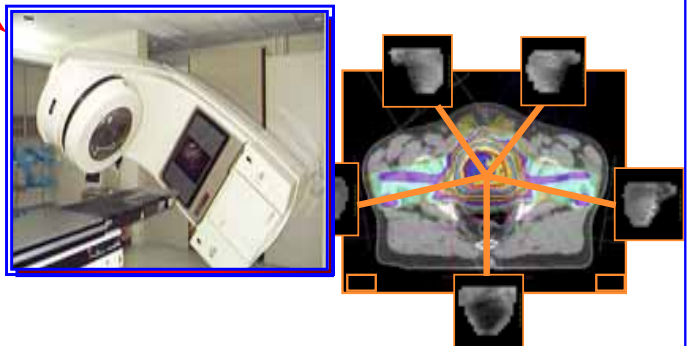
病巣を正確に位置決めして(「定位」という)放射線を三次元方向から集中させ照射する治療法。

1. ガンマナイフ
2. サイバーナイフ



強度変調照射法

リアックによる多門照射で線量集中性を改善した治療法



ヨウ素125シードによる前立腺癌の治療

わが国の放射線治療の課題

21世紀は最先端線量集中照射法の時代
 しかし、わが国では
治療専門医の不足
QA/QCを担う医学物理士の不足
が顕在化、問題となっている

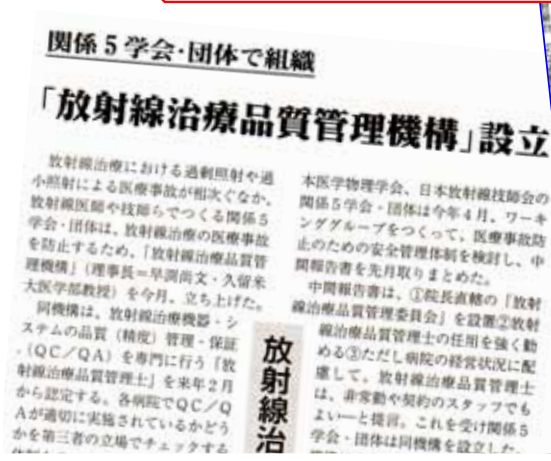


国名	放射線腫瘍医	放射線技師	医学物理士	治療施設	リニアック
日本	3.6	11.3	0.3	5.9	5.8
米国	15.6	33.3	9.1	7.4	11.9
英国	8.3	28.5	8.1	1.0	3.2
ドイツ	7.3	47.3	5.8	2.6	3.7
オランダ	9.2	48.5	3.9	1.2	5.8
中国	3.9	1.9	0.5	0.6	0.8
韓国	2.7	5.5	0.7	1.5	1.8

癌治療と宿主 11-19, 16(3), 2004

わが国では1998年以来、少なくとも
11件の放射線治療事故が発生。

- 患者への過剰照射事故 6件
- 患者への過少照射事故 2件
- 作業員への被ばく事故 2件
- 線源紛失 1件



- 求められる対策**
- 人材の育成(認定医、認定技師)
 - 認定施設の制度化
 - **放射線治療品質管理士の認定制度**
 - より安全な医療機器の開発



わが国のがん対策と重粒子線がん治療

がんは昭和56年以降、依然として日本人の死亡原因の第一位(約3割)を占めている。

わが国のがん対策

1984～1993: 対がん10カ年総合戦略

1994～2003: がん克服新10か年戦略

2004～ : 第3次対がん10か年総合戦略

【第3次の戦略目標】

- 進展が目覚ましい生命科学の分野との連携を一層強力に進め、がんのより深い本態解明に迫る。
- 基礎研究の成果を幅広く予防、診断、治療に応用する。
がん予防の推進により、国民の生涯がん罹患率を低減させる。
革新的ながんの予防、診断、治療法を開発する。
- **全国どこでも、質の高いがん医療を受けることができるよう「均てん化」を図る。**

がん対策、これまでの成果

がんの遺伝子レベルでの本態解明

「がんは遺伝子の異常によって起こる病気である」という概念が確立

診断・治療技術の目覚ましい進歩

各種がんの早期発見法の確立、標準的な治療法が確立

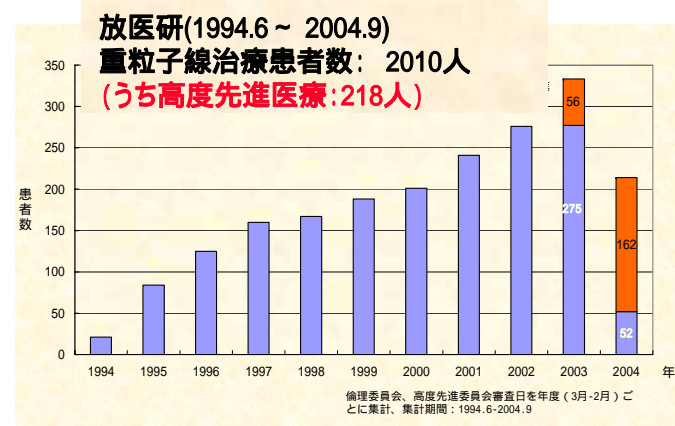
HIMACプロジェクト開始

- 粒子線治療施設が2から6ヶ所に増加
- 重粒子線がん治療は高度先進医療として承認された(2003.11)。

重粒子線がん治療の展開

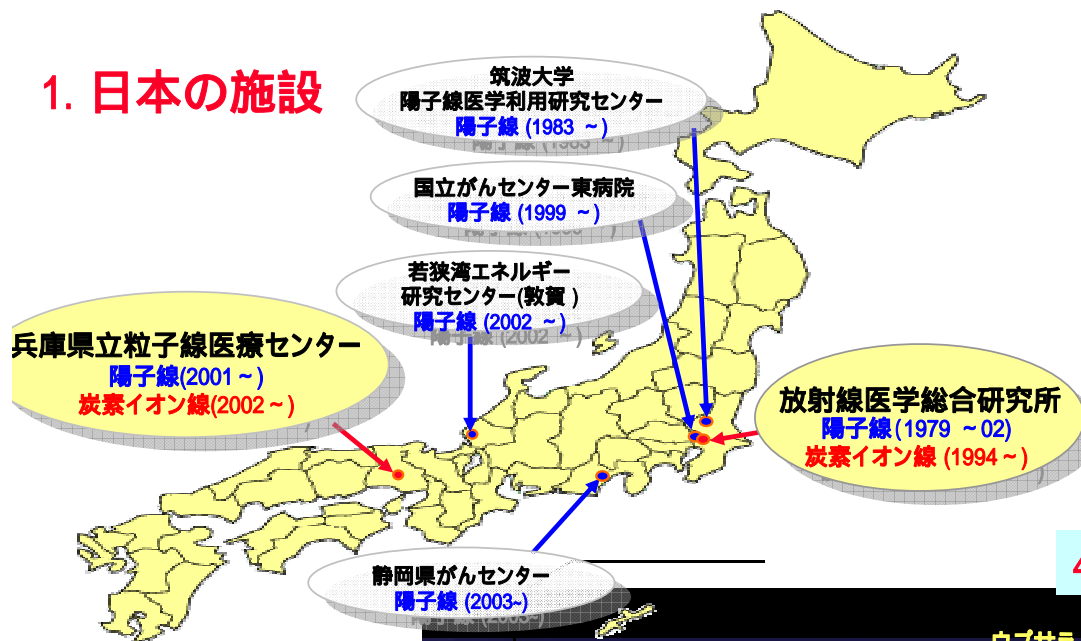
重粒子線がん治療および診断の高度化と標準化

重粒子線がん治療の全国的な普及に向けて、小型で安価な重粒子線加速器および先端的照射システムの開発、普及



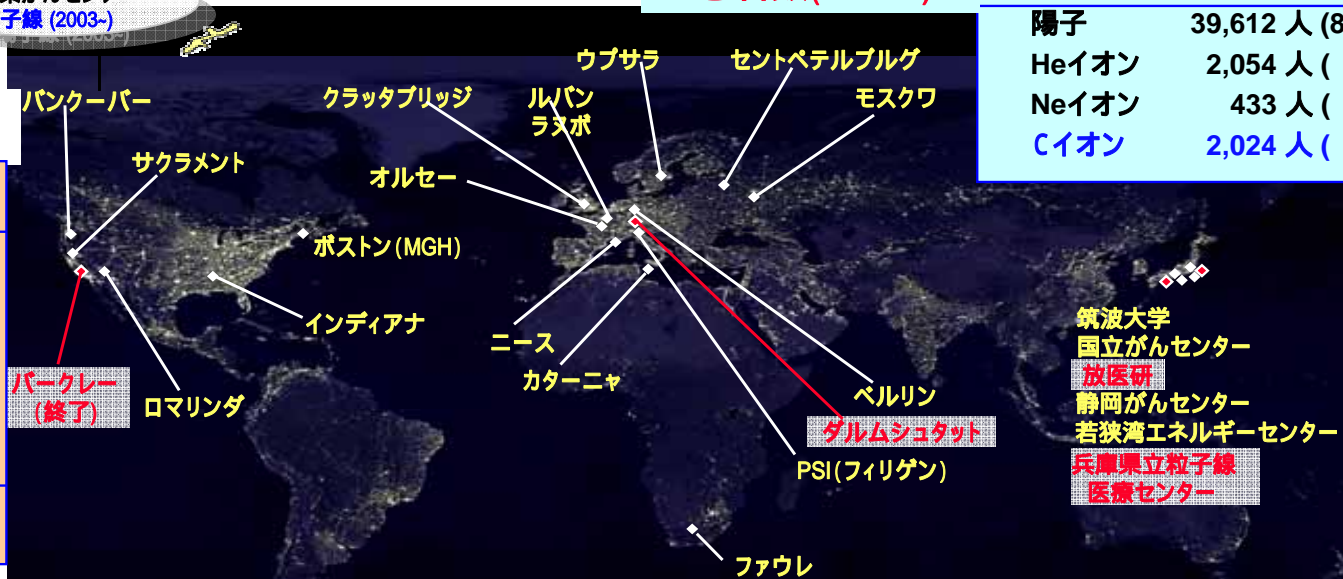
世界の粒子線治療施設

1. 日本の施設



2. 世界の治療施設

場所	陽子	炭素
米国	4	-
カナダ	1	-
ヨーロッパ	8	1
ロシア	3	-
南ア	1	-
日本	5	2
合計	22	3



3. 重粒子線治療を建設中・計画中 7

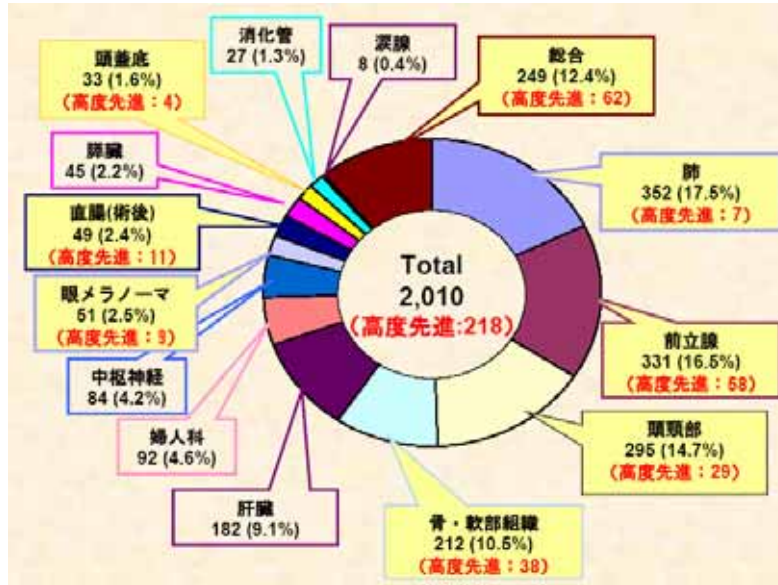
場所	線質	期間
稼働中		
放医研 (日本)	P C	1979 ~ 02 1994 ~
ダルムシュタット (ドイツ)	C	1997 ~
兵庫 (日本)	P+ C	2001 ~
建設中		
ハイデルベルグ (ドイツ)	P+ C	2007
計画中		
群馬大学 (日本)	C	2007
TERAプロジェクト (イタリア)	C	2007
Austronプロジェクト (オーストリア)	P+ C	2009
Lyon (フランス)	C	-

4. 患者数(2004.7)

患者数合計	44,123 人 (100 %)
陽子	39,612 人 (89.8%)
Heイオン	2,054 人 (4.7%)
Neイオン	433 人 (0.9%)
Cイオン	2,024 人 (4.6%)

放医研における重粒子線がん治療の進展

1. 重粒子線登録患者数
 (1994年6月~2004年9月)
 合計:2010人
 (高度先進医療:218人)



2. これまでの経過

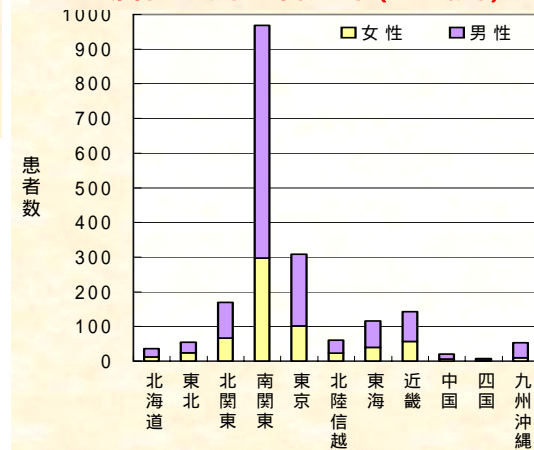
- 平成6年から炭素イオン線を用いた臨床試験を開始、平成16年9月までに 2,000名以上に適用。
- 夜間や週末など臨床試験を行わない時間は、生物・物理工学的実験のための**共同利用施設**として、国内外の研究者に提供、毎年400人を越える外部研究者が利用。
- 平成15年11月より**高度先進医療**を実施。
- 重粒子線がん治療の普及に向けて、**装置小型化の研究開発**。

重粒子線がん治療の展開
 治療法の高度化と標準化
 治療装置の普及

3. 重粒子線の臨床的特徴

'短期照射法'が可能: 一人平均13回
 肺がん、肝がんなどでは、1、2回で済む
 比較的回数の多い前立腺がんでも、一般の放射線治療の1/2の16~20回で済む。
'手術困難ながん'に効く
 頭蓋底、頭頸部、骨盤領域など
'放射線抵抗性がん'に効く
 肉腫、悪性黒色腫、腺がん、など

4. 居住地別患者分布(地域別)



患者は全国から集まってきているが、70%は関東周辺から。

放医研における重粒子線がん治療の今後の課題

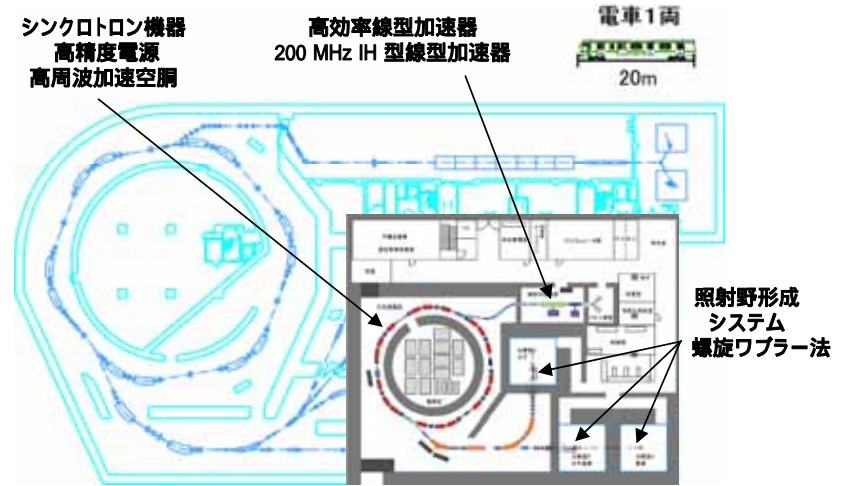
1. 臨床試験の継続

- ・超難治性がんに対する取組と短期照射法の確立
- ・高度先進医療によるデータの蓄積と臨床へのフィードバック

2. 小型炭素線治療装置の開発

サイズ、価格ともにHIMACの1/3を目標
に小型普及器を開発する

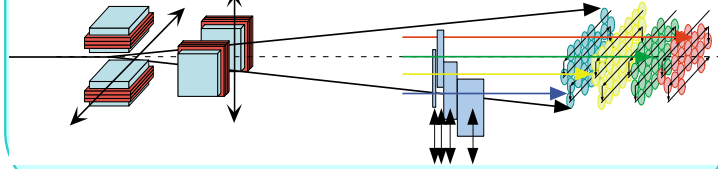
高効率の線型加速器を採用することにより入射器の小型化を図る。
新たな磁性材料を用いて小型で単純な高周波加速空洞を開発する。
これまでの基礎的な開発成果の上で大電力を投入できる装置を試作する。
新たな照射野形成システムの開発。



3. 照射方法の高度化に関する研究開発等

スポットスキャンニング照射法

サイズを絞ったビームを制御して、点描するように照射する手法。きめ細かい照射形状ができ、ポラリス・コリメーターを作成する必要がなくなる。



* 照射方法の高度化の一環で炭素線回転ガントリーも検討

呼吸同期照射法

患者の呼吸による動きを検出して、狙った位置でのみビームを照射する手法。

治療計画の高度化

治療現場の最新の条件に合わせて治療計画を修正。

難治性がんの治療成果向上
・
副作用のリスク低減

他施設への成果普及

放射線医学は、
放射線診断
核医学
放射線治療

IVR(画像支援による血管内手術)
の4つからなる。現在、放射線科専門医は約4,600人。
このうち診断と核医学に携わる放射線科医は全体の
9割を占めるが、それでも、放射線医学はここ四半世
紀で急速に発展したため、人手不足は深刻で、日本
の放射線科医は人口比で米国の3分の1程度。

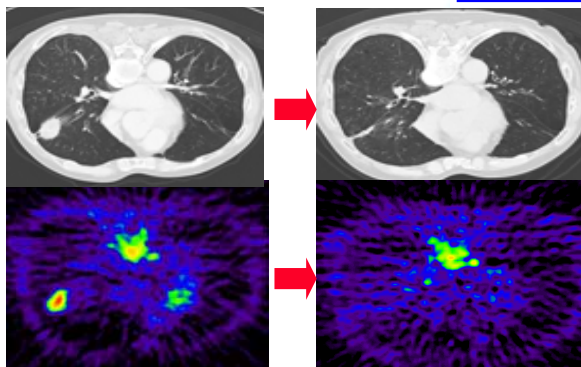
画像診断

一般診断: X線検査(単純写真、透視など)
X線CT(コンピュータ断層撮影)
MRI(磁気共鳴画像)
超音波

アイソトープ診断: PET
SPECT



PET-CT装置



1972 ハンスフィールド、X線CT撮影法開発

放射線には、種類とエネルギーによ
って異なるが、大なり小なり物質を透
過する能力があります。
ガンマ(X)線は電磁波であっても質
量も電気ももたないために、物質との
相互作用の程度がほかの放射線に比べ
て弱く、したがって物質中を通過する
さいに、なかなかエネルギーを失わな
いので透過力が高いといえます。
写真作用
放射線を写真フィルムや写真乾板に



CTの利用

病気診断
検診(低線量CT)
放射線治療

CTは、放射線治療において線量
分布計算に必須。

**CTがなければ、今の放射線照射
技術の高度化はなかった！！。**

画像再構成の理論

CTとは、2次元あるいは3
次元の物体は、全投影
データから一意的に求めら
れるというラドンの理論
(1917)により、X線投影から
数学的にもとの断面を推定
し、それをデジタル画像に
したもの。



マルチスライスCT装置

3次元画像データによる3次元人体構成

3次元血管造影とコンピュータグラフィックス
仮想内視鏡
仮想手術
オートプシーイメージング(Ai)

X線CTの開発

—より早く、精密に、広い範囲を—

1. CTスキャナ世代と走査ジオメトリ

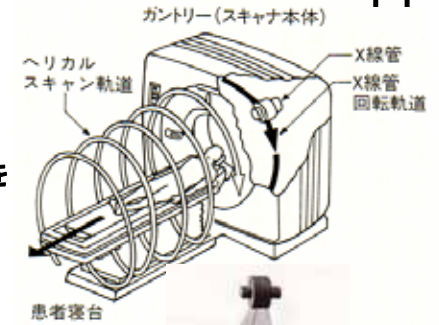
被験体の動きによりアーチファクトが生じ画像が劣化する。これを防ぐため、撮影時間を短縮を目的として、様々な走査ジオメトリが考案された。医療用CT装置の一号機は1971年にロンドンの病院に設置された。

CT	方式	ビーム	検出器	撮像時間
第一世代	T/R	ペンシルビーム	単一検出器	数分
第2世代	T/R	微小ファンビーム	複数検出器	20秒
第3世代	T/R	広角ファンビーム	検出器回転型	5秒
第4世代	S/R	広角ファンビーム	検出器固定型	1-2秒
第5世代	電子銃	コーンビーム	検出器固定型	10msec

2. 撮像方式による分類

1) ヘリカルスキャン: 日本で発明(1982)

テーブルを動かしながら連続的スキャンを行う方法で、ボリュームデータが得られる。実用的な3次元CTが可能となった。



2) マルチスライスCT

検出器列を多層にして(4~16列)、高速に多断面の撮影を可能にしたもの。

放医研で256列CTを研究中。



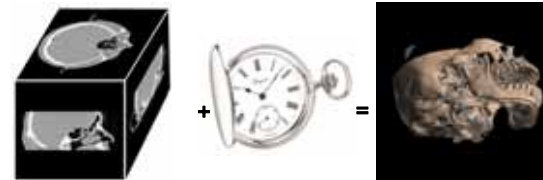
Z方向8素子

3) コーンビームCT(4次元CT)

放医研で開発中。

円錐状ビームを照射し、2次元検出器で投影データを収集して3次元の立体像を再構成する。2次元検出器として、フラットパネルが導入された。

心臓の動態画像



3D(ボリューム) + 1D(時間) = 4D

QuickTimey C2
YUV420 ERATEIBEN ALIEEVeEOEAE
C7*QcAQE8ENE EEC7*acCEC7*7C...CQXovC-C AB

今後の課題

低線量X線CT装置の開発。

より早く、より精密で、より広範囲な検査可能なCTの開発。

放射線量が注目されている検査・手技

- **CT**: 線量が多い検査である。装置の高度化より特殊検査が増加し、線量も増加傾向にある。一方で線量低減を図り検診にも応用が始まっている。
- **Mammography**: 乳腺は放射線感受性が高い組織である。平成12年から集団検診に採用されている。
- **IVR**: 治療をかねた手技であり、時に長時間に及び重篤な皮膚障害を引き起こす場合がある。

ICRP Publ.73 医学における放射線の防護と安全

ICRP Publ.85 IVRにおける放射線障害の回避

ICRP Publ.87 CTにおける患者線量の管理

UNSCEAR 2000年報告書 放射線の線源と影響

IAEA Safety Standards (Safety Series No.115)

日本におけるCT検査の変化

調査年	CT数	検査数 x1000	集団実効線 量(ED)人・Sv	ED/人口 mSv
1979	766	1,454		
1989	3,882	11,904	99,000*	0.80
2000	11,050	36,550	295,000	2.3

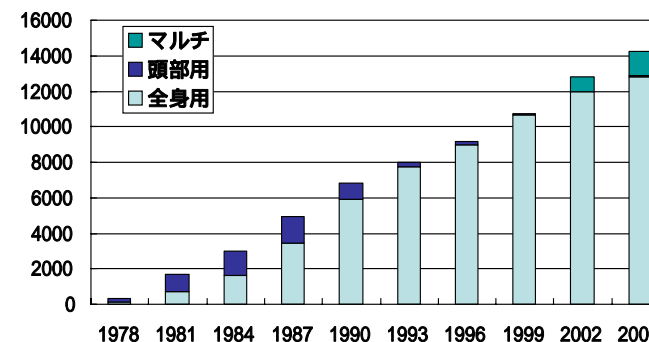
日本医放会誌64; 151-158, 2004

胸部検査時の線量比較例

	胸部単純 (μ Sv)	胸部CT (mSv)
赤色骨髄	33.8	5.8
結腸	2.8	2.4
肺	107.7	19.3
胃	19.4	14.5
膀胱	0.2	0.1
乳房	34.6	14.4
肝	25	13.6
食道	89.5	18.7
甲状腺	31.2	20.9
骨表面	124.9	15.3
実効線量	31.5	9.2

医療に於いては
実効線量よりも照
射野内の臓器組
織線量が重要

日本におけるCT装置普及数の変遷



月刊新医療10月,2003

医療被ばくの最適化

病院等における診療機器保有状況(重複計上)平成11年

患者が受ける便益(病気の診断・がん等の治療効果)とリスクを定量的に評価し、合理的に線量低減できる方法の開発が必要
(CT, IVR, PETなど新しい放射線診療にも対応するため、常に継続されている必要あり)

リスク・便益の評価手法:
前提として診療の実態把握が必要
手法の更なる研究開発が求められる

線量, リスク低減方法:
・QA・QCにより線量を適切にコントロール可能(例:マンモグラフィの線量分布)

施設数

平均乳腺線量 (mGy)

日乳癌検診学会誌8(2):168-173,1999

低すぎる線量:
読影不適画像

高すぎる線量:
不必要な被ばく

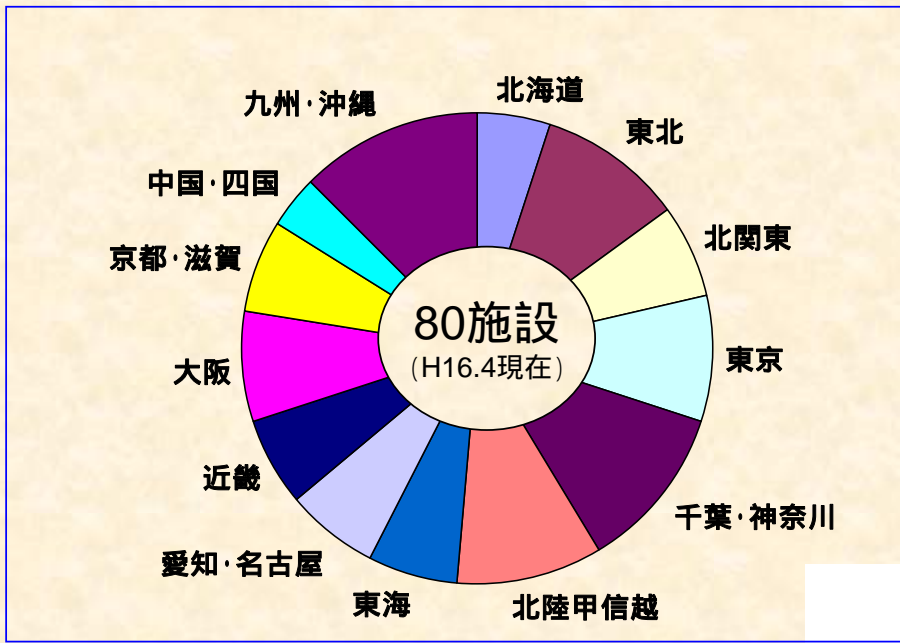
病院	施設数	台数	一般診療所	施設数	台数
上部消化管ファイバー	6775	20870	上部消化管ファイバー	17224	22062
気管支ファイバー	3830	9182	気管支ファイバー	1096	1203
大腸ファイバー	5669	11646	大腸ファイバー	7130	8407
デジタルラジオグラフィ装置	1195	2082	単純X線撮影装置	54038	58002
血管連続撮影装置	2554	3223	頭部用X線CT装置	521	532
全身用X線CT	6613	7361	全身用X線CT	2796	2800
RI 診断装置	1036	1319	骨塩量測定装置	6131	6227
MRI	2622	2938			
SPECT	755	1003			
骨塩量測定装置	3064	3154			

厚生労働省「医療施設調査」

現在:放医研にて実態調査を実施(回収率等に問題有り)
放射線診療機器数及び検査件数の調査は、関係省庁のサポートが必要
線量把握は行政全体のシステム作りと、放射線・医療関連学会との緊密な協力関係が求められる。

- ・ 医療従事者の教育
- ・ 適切な放射線防護体制
- ・ 装置のQA/QCを担う医学物理士の確保

日本におけるPET施設数(H16年4月現在)



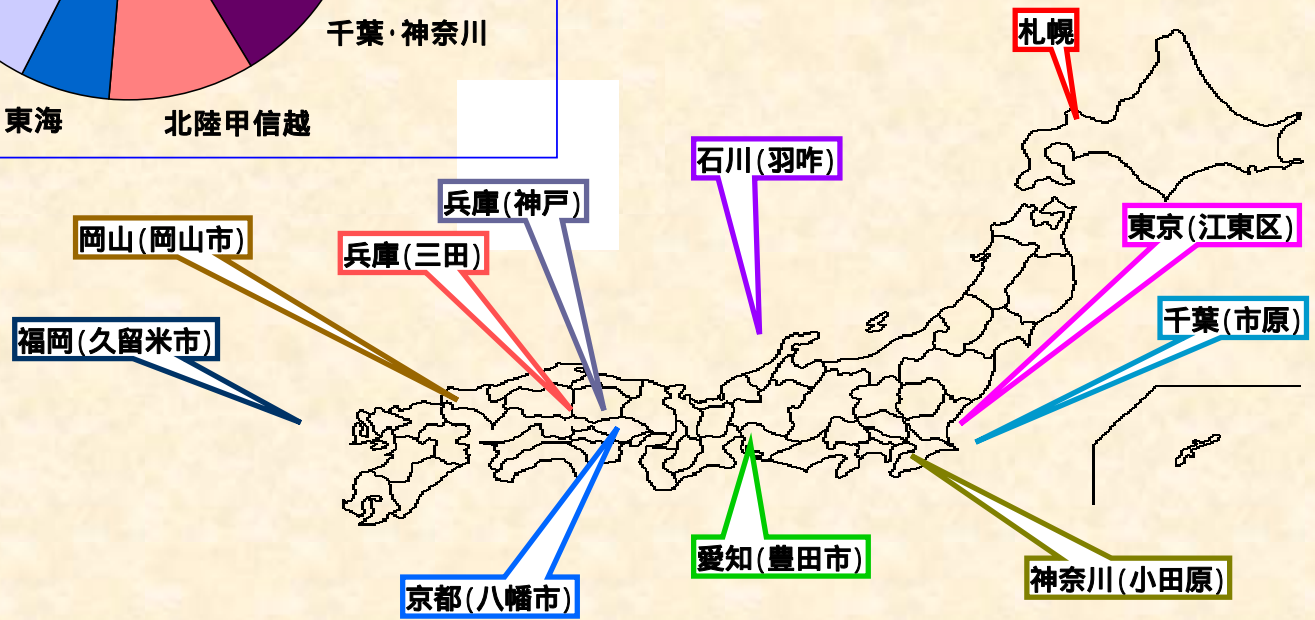
PET(陽電子放射断層撮像法) [Positron Emission Tomography]

PETとは、生体中の放射能を測定し、コンピュータで処理された断層画像を出力する方法の一つ。"目印"として**ポジトロン(陽電子)**を放出する薬剤(放射性医薬品/放射薬剤)を用い、薬剤が体内を移動して心臓や脳などに集積する様子を、薬剤から放出されたガンマ線から検出する。

FDG供給計画

(日本メジフィジックス)

- 開設地: 北海道(札幌市)、東京都(江東区)、愛知県(豊田市)、京都府(八幡市)、岡山県(岡山市)、福岡県(久留米市)
- (新規) 兵庫県(神戸市)、神奈川県(小田原市)
- 既存施設: 千葉県(袖ヶ浦市)、兵庫県(三田市)
- 共同開発者施設: 石川県(羽咋市)



分子機能を覗く(生体機能の画像化)

分子プローブ
次世代計測技術

ミクロ的細胞診断へ
微量活性物質の測定と可視化
ピコモルレベルでの検出

展開

分子イメージング

細胞や生体組織内の特定信号を発信している分子を捉えて画像化する技術

- レセプタ・リガンドモデル
- 抗体・抗原モデル
- トランスポータ・基質モデル
- 酵素・基質モデル
- 複合・ハイブリッドモデル

多様な分子プローブの開発

放医研で早期に適応可能

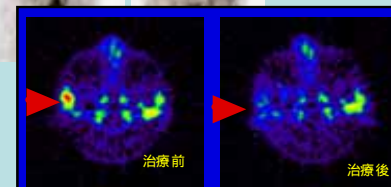
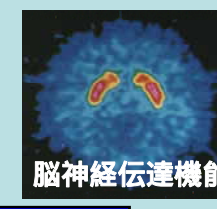
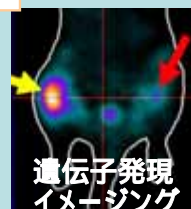
- 放射線治療の精密な適応と効果判定
(生物学的評価に基づく)
- 低酸素細胞組織の可視化
(^{62}Cu -ATSMによるイメージング)
- がん増殖能に基づく組織内不均一性の可視化
- 治療薬(分子標的薬剤等)の評価
適応の決定と副作用の評価
抗がん剤の適応と副作用等
個別化治療の最適化評価システム開発

今後の研究

- 遺伝子治療や再生医療の評価
遺伝子発現イメージング
DNA, RNA挙動可視化技術の開発
- リガンド動態研究と輸送システム開
- 創薬のためのリガンド開発

放医研

放射線を利用した画像
診断研究の拠点
生体機能の
可視化・解明・応用



脳腫瘍の検出と治療効果

がん診断精度の向上

新しい分子イメージングによりがん診断が向上

多様な分子プローブの可能性(腫瘍)

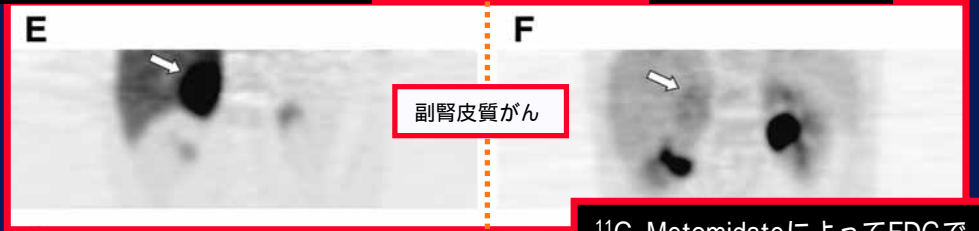
- 遺伝子突然変異の検出
- 腫瘍抗原
- 腫瘍レセプター
 - 乳癌レセプター
 - コレシストキニン-B / ガストリン レセプター
 - レセプター
- 腫瘍代謝
 - 副腎皮質ホルモン合成酵素阻害**
 - チミジンリン酸化酵素
 - 葉酸レセプター (抗癌剤methotrexateの作用)
- 腫瘍低酸素
 - 低酸素誘導因子 (HIF)
- 腫瘍増殖
 - DNAポリメラーゼ
 - DNAアナログ
- アポトーシス
 - アネキシン V
- 血管新生
 - VEGF
- 多剤耐性
 - 悪性腫瘍のPgp過剰発現 (ダウノルピシン、ビンクリスチン、エトポシド、アドリアマイシンへの耐性)
- レポーター遺伝子

¹¹C-Metomidate
 副腎皮質ホルモン合成酵素阻害
 (11 ヒドロキシラーゼ活性阻害)

副腎皮質細胞特有のホルモン合成機能
 遺伝子にコードされた細胞機能の発現に
 即した画像化手法
 (分子イメージング)

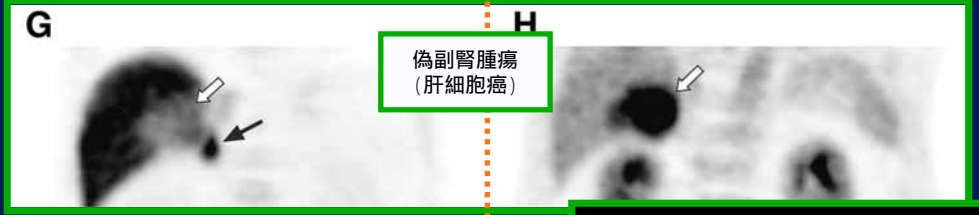
11C-metomidate PET

18F-FDG-PET



¹¹C-MetomidateによってFDGでは描出できない副腎皮質腫瘍が正確に診断される。

← 白矢印 副腎腫瘍
 ← 黒矢印 正常副腎皮質



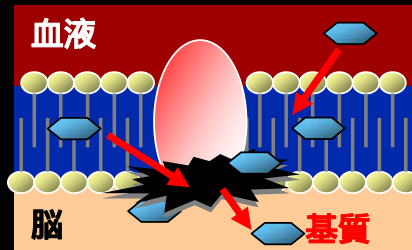
¹¹C-Metomidateによって副腎腫瘍に紛らわしい腫瘍が鑑別できる

Data: Heikki Minn, et al.,
 University of Turku, J Nucl Med
 2004;45:972-979

脳イメージングの展開

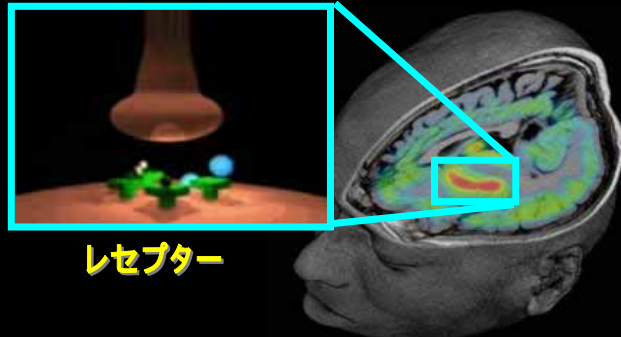


薬物動態



血液-脳関門を構成しているP糖蛋白の基質を標識しP糖蛋白を可視化。
タンパク機能正常時に脳内に入らない分子が、機能を阻害した時には脳内に入ることを確認できる。

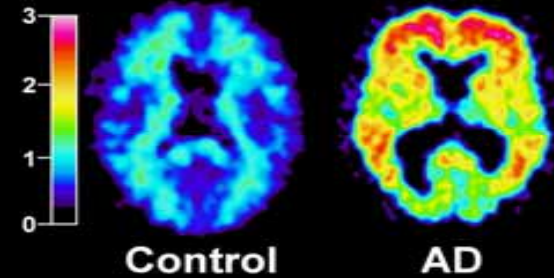
作用部位における薬効評価



レセプター

認可使用量300~1200 mg/日の抗精神病薬の至適用量が30~120mg/日であることが判明。
分子イメージングにより薬の動きを作用部位で見ることが可能。

分子診断 (アルツハイマー病)



発症前に アミロイド蛋白が蓄積することを画像として確認。
早期診断・治療法の開発に向けた重要なデータを提供。

PET/CTの意義

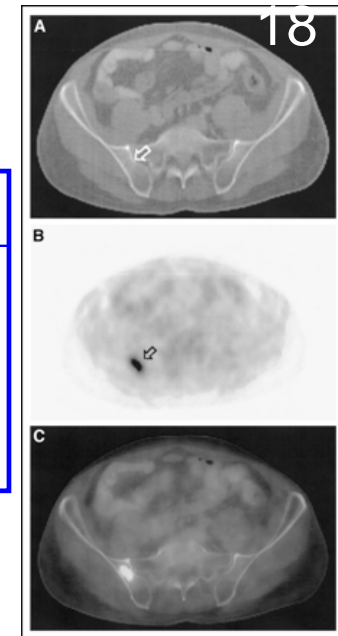
CTは形態学的特徴を画像化したもの
PETは病変や組織の機能を画像化したもの

CT付PET装置 (PET/CT) により
機能画像と解剖学的画像の融合

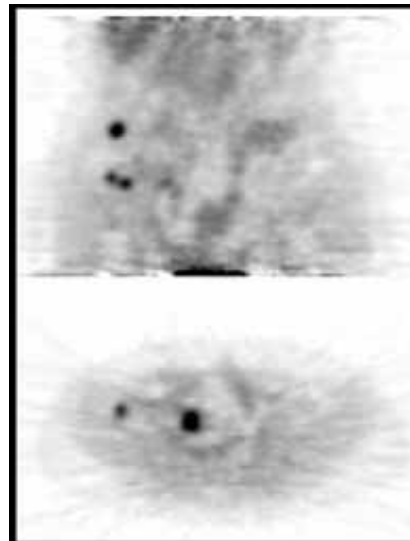
PET/CTは、他の診断法に比べて
正診率が有意に向上していた
(JCO 22:4357-4368, 2004)

診断法	正診率
CTのみ	63%
PETのみ	64%
併用 (PET+CT)	76%
PET/CT (一体型)	84%

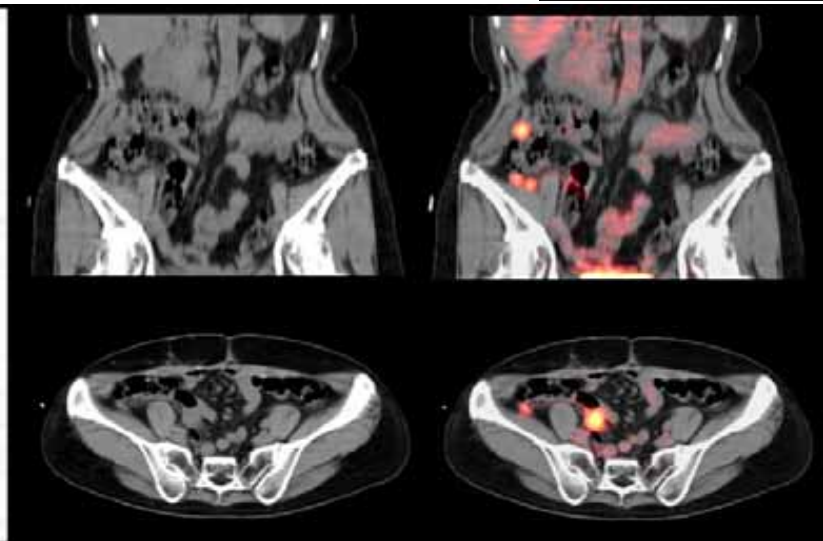
病巣はCTで分からないが、PETで異常集積あり。
両者を合わせたもので異常部位が分かる。



CT付PET装置 (PET/CT)



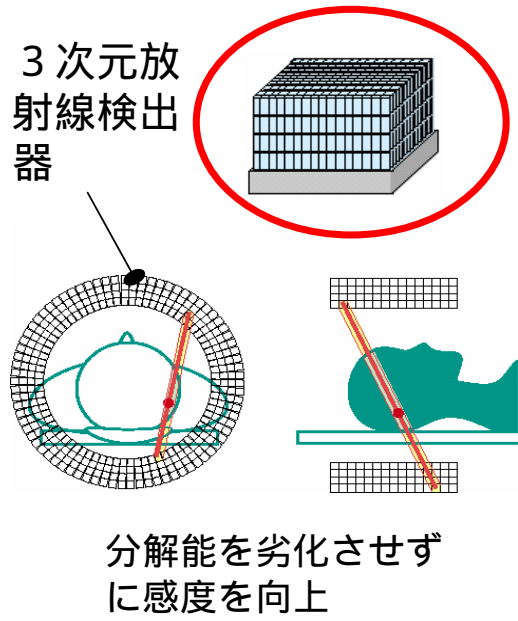
PET



CT

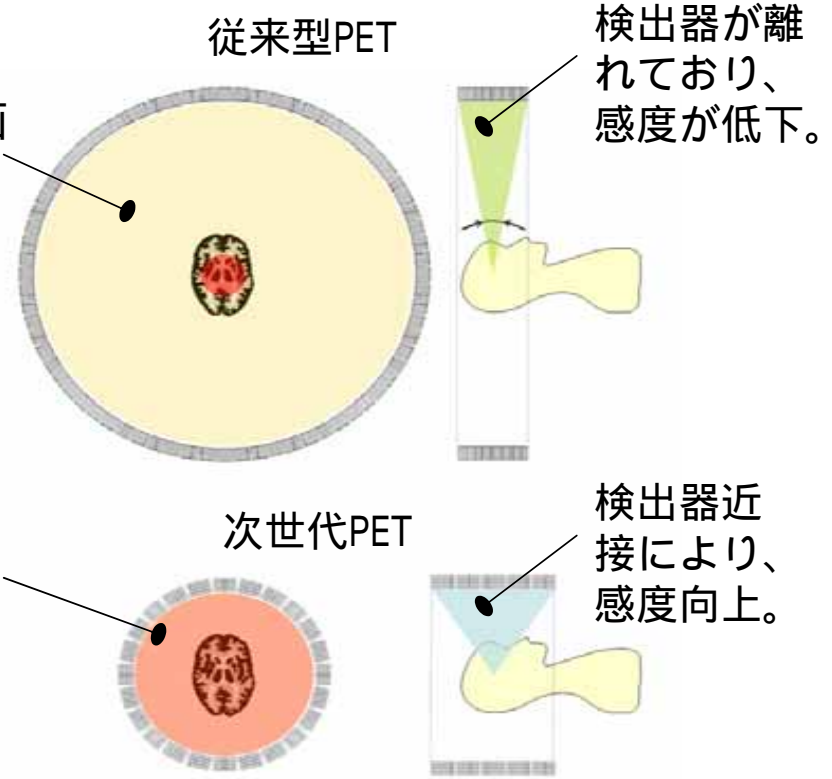
FDG PET/CT

次世代PETの原理と特徴



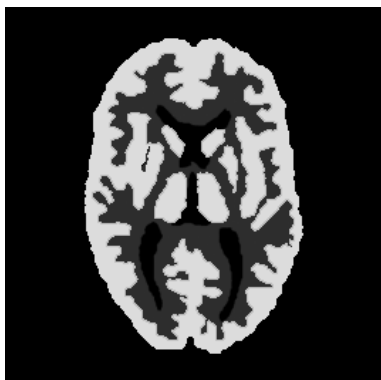
従来型PETでは、画像の中心部を除き解像度が劣化する。

3次元放射線検出器を使うと、近づけても画像全体で高解像度を保つ。

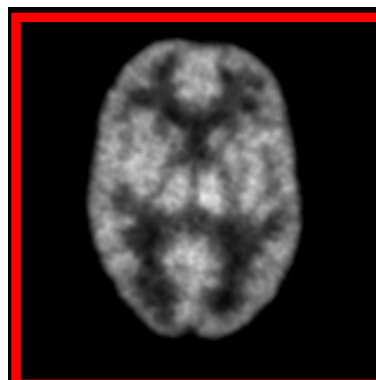


次世代PET装置の開発

1. jPET-D4 (1/5 block試作機) vs. HR+ 同条件による2D再構成比較

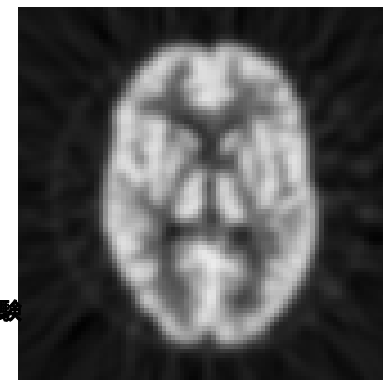


Hoffman ideal image4.bmp



jPET-D4_2D224_041221Hoff.f1-
10.m4z14.Rsbt.NAVMC.AC.itr22.PF.Bsbt65.bmp

(work560 1ペア実験
NSD=0.145付近)

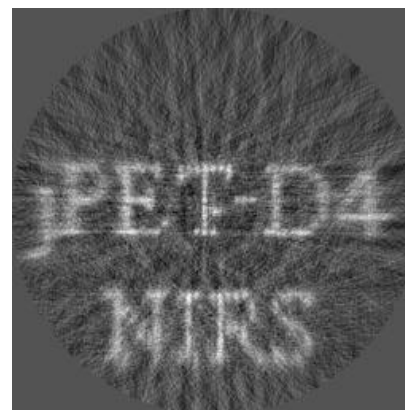


NIRS_a7c_3657_6(p42).bmp

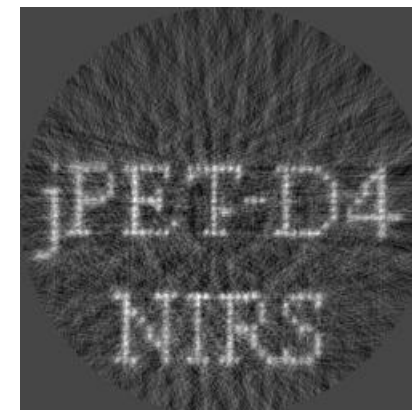
2. jPET-D4 による Depth-of Interaction (DOI) の効果を実証

視野周辺でも解像度
は劣化しない(B)

2.2 mm 直径 Ge-Ga 線源
5.0 mm 間隔



(A) non-DOI



(B) DOI

放医研の緊急被ばく医療に関する取組み

放射線障害研究

- ・高線量被ばく治療に関する研究
- ・体内除染剤、放射線防護剤に関する研究
- ・線量評価技術に関する研究
- ・被ばく医療データベースの整備

人材育成

- 緊急被ばく医療に関する医療関係者、原子力防災業務関係者に対する研修
- ・緊急被ばく医療セミナー
- ・緊急被ばく救護訓練課程 等

緊急被ばく医療体制整備

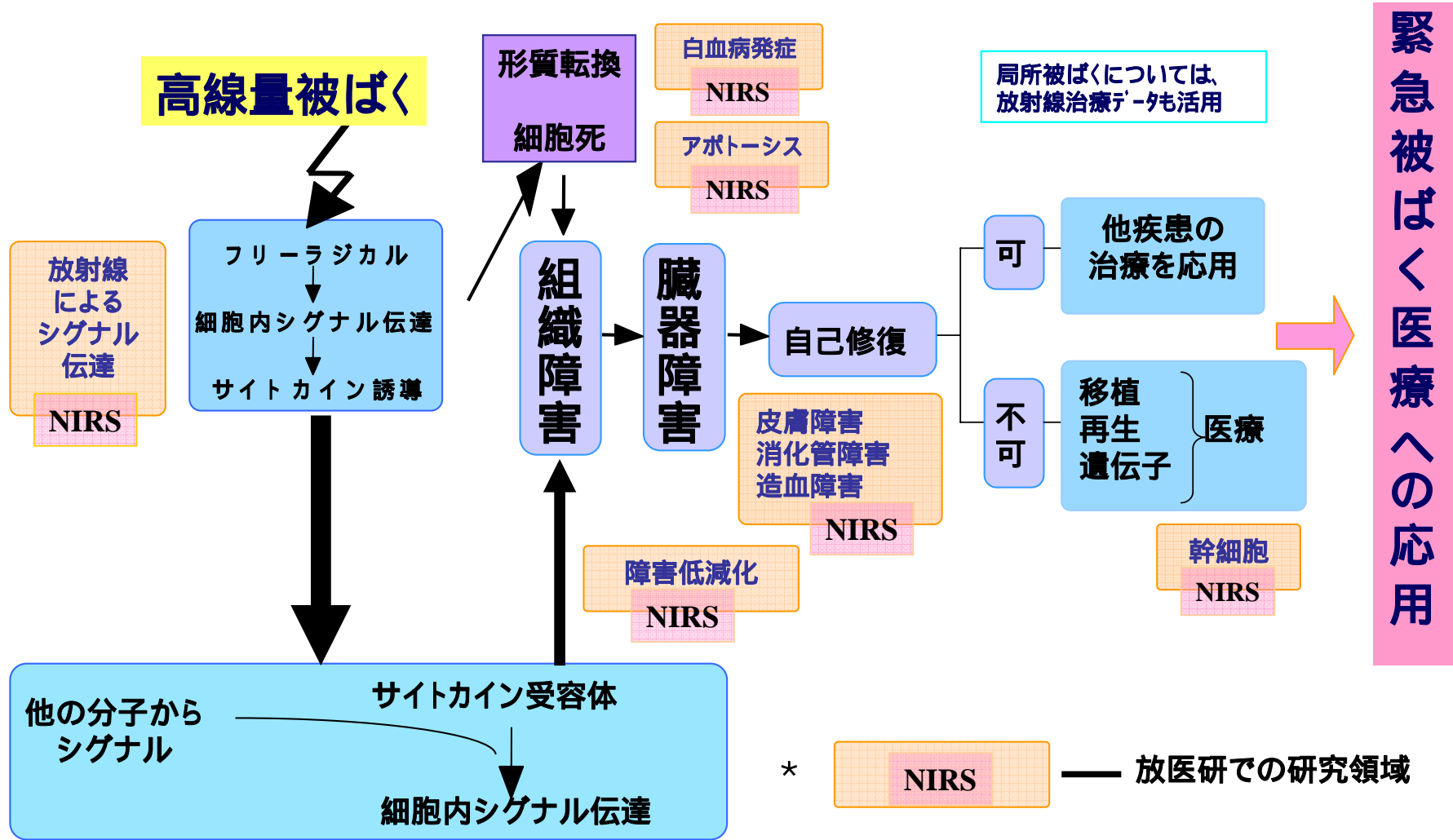
- ・緊急被ばく医療ネットワークの構築
- ・三次被ばく医療機関としての対応
重篤な患者の受入れ・治療、初期・二次被ばく医療機関や消防・救急に対する支援・助言



事故等への対応

- ・被ばく医療相談(電話相談、患者来所、現地出向)
- ・国立大蔵病院の被ばく事故 (2001年12月)
- ・八日市場電子機器工場 X線被ばく事故(3名) (2000年6月)
- ・JCO臨界事故への対応 (1999年9月30日)
- ・第五福竜丸フォローアップ調査(1954年3月1日)
- ・タイ(2000年)、パナマ(2001年)への専門家派遣

高線量被ばくの治療研究



低線量放射線の人体影響研究

ICRPなどにおいて必要とされる防護上のパラメーターを蓄積。
メカニズム(ライフサイエンス研究)に基づいたの防護基準

低線量放射線とは100mSv以下の線量

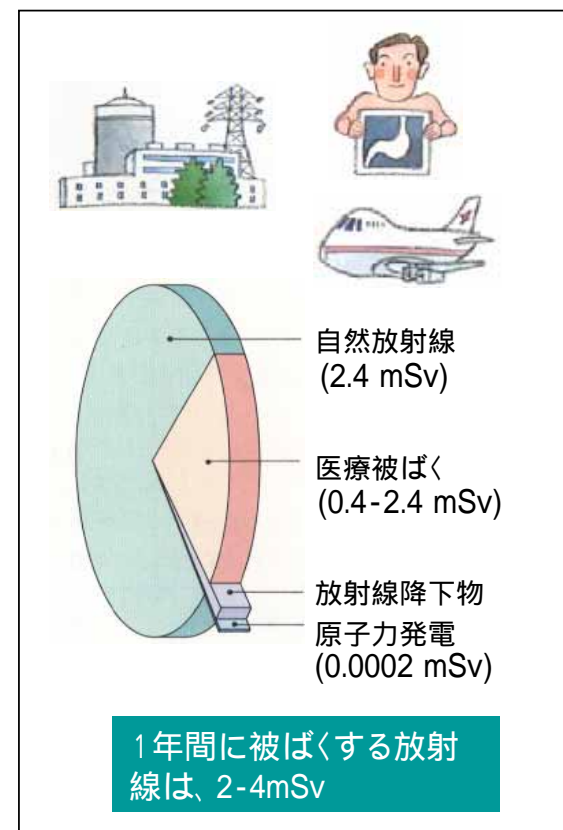
疫学調査で、発がんリスクがようやく認められるのが、50-100mSv。日本人の被曝線量は、通常的生活環境で、自然放射線や医療による被ばくを含めて2-4mSv。

低線量放射線影響研究が世界的に開始

- ・米国(エネルギー省):100mSv以下の生体応答メカニズムの基礎生物研究(20億円x10年)
- ・ヨーロッパ(EU):ヒトの健康を重視し、個人の感受性のちがいに関する研究(4億円x5年)
- ・日本:放射線防護のパラメーターと発がん機構を重視

放医研で行なわれている安全研究

- ・動物を用いた低線量放射線影響の実証実験
(中性子影響、重粒子線影響、プルトニウム影響、化学物質との複合影響)
- ・X線、マイクロビームやラドン照射による細胞レベルの研究
- ・放射線感受性遺伝子マウスを用いた放射線発がんの機構解析研究(低線量放射線影響の特徴を明らかにする。)

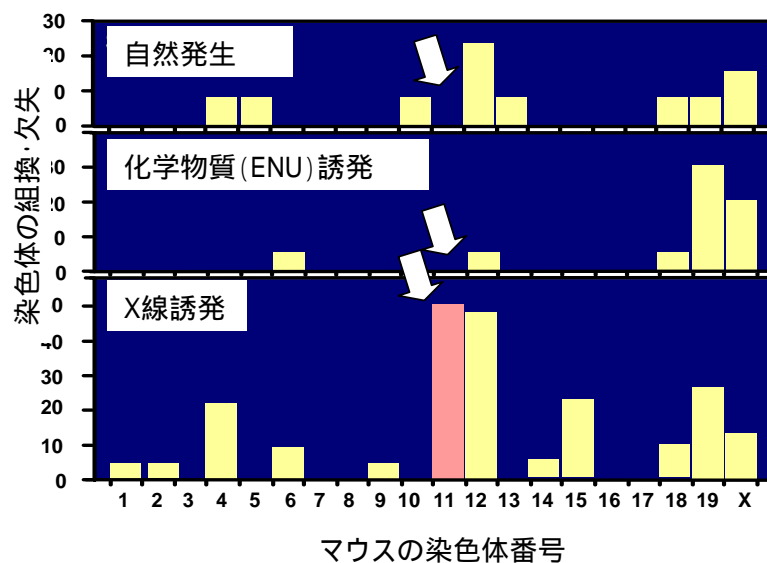


防護とライフサイエンス研究の融合

低線量放射線被ばく影響の特異性を明らかにした研究例

放射線被ばくをした証拠

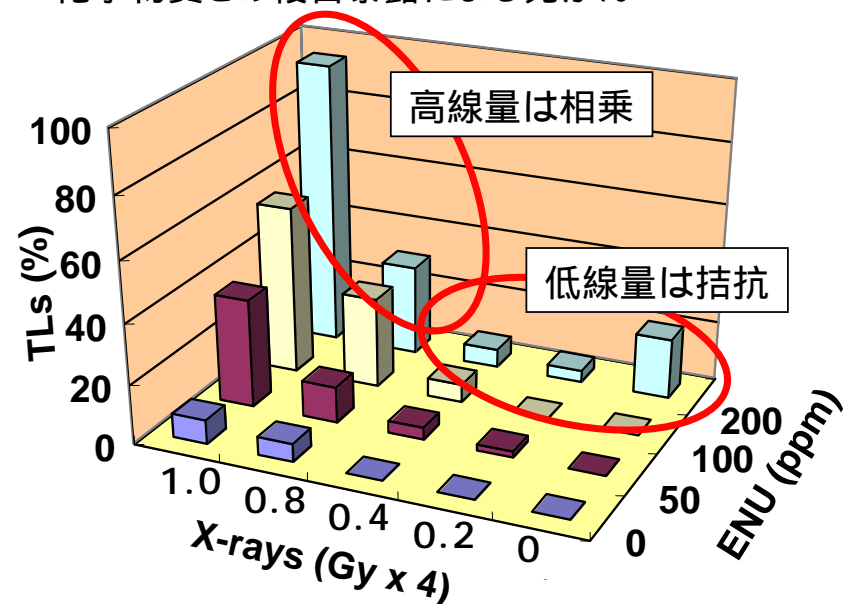
T細胞白血病におけるゲノム変異



放射線誘発白血病には、第11番染色体に特有のゲノム変化がある 放射線被ばくの証拠。

低線量放射線が発がん抑制する

化学物質との複合暴露による発がん



高線量放射線は化学物質との複合暴露で発がんリスクを高めるが、低線量は低くする。

放医研における 放射線防護研究の今後

低線量影響実験棟 (H16年)



中性子加速器 (0.5-2MeV)

放射線防護拠点をめざす

リスク研究の国際的コンタクトポイント

- ・データの収集と発信
- ・リスクコミュニケーション

胎児・こどもの防護研究

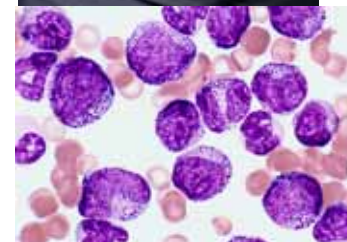
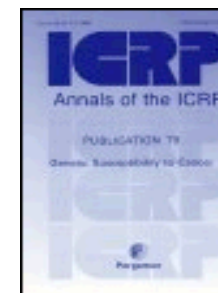
高LET放射線 (中性子、重粒子) による発がん影響

低線量連続被ばくの発がん影響、次世代影響

医療におけるリスクの低減 (2次がんと防護剤、増感剤)

低線量応答、DNA修復
環境を防護

バイスタンダー効果
(マイクロビームの利用)



白血病