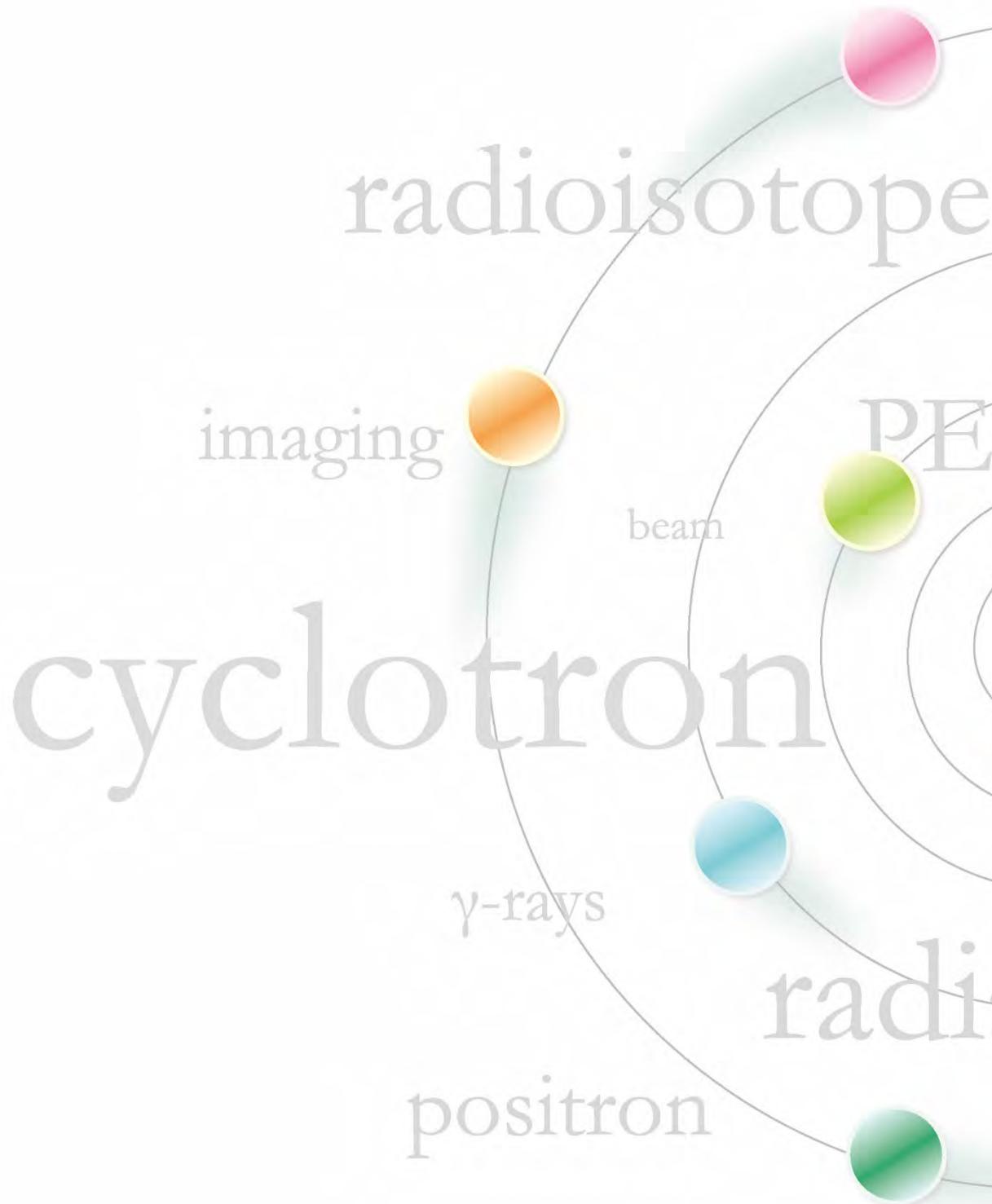




東北大学サイクロトロン・
ラジオアイソトープセンター
Cyclotron and Radioisotope Center



沿革:	昭和	49年 4月	4か年計画でサイクロトロン建設決定、建設委員会発足
		50年 5月	実験室その他工事起工式
		52年 4月	サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター設置 設置目的:サイクロトロン並びに高レベル、短寿命 RI の多目的利用 及び RI 安全取扱いの全学的な教育・訓練
		8月	加速器研究部発足
		10月	森田 右教授初代センター長に就任
		12月	680AVF サイクロトロン、ビーム引き出しに成功
		53年 2月	測定器研究部発足、サイクロトロン棟、ラジオアイソトープ棟落成
		6月	宮城県沖地震
		53年 7月	ISOL・TOF 装置完成
		11月	放射線管理研究部発足
		54年 6月	センター開所式
		7月	第1回サイクロトロン共同利用開始
		10月	センター事務室発足
		55年 8月	核薬学研究部発足
		56年 3月	PET 装置 ECAT-II 設置
		7月	研究棟(現分子イメージング研究センター)落成
		57年 6月	東北新幹線開業
		58年 4月	ポジトロン核医学臨床研究開始
	59年 7月	センター4 研究部大学院各研究科の基礎部門等になる	
	61年 3月	多断層 PET 装置 PT931/04-12 設置	
	62年 3月	TOF-PET 装置 PT711 設置	
	5月	サイクロトロン核医学研究部発足	
	7月	仙台市営地下鉄南北線開業	
	平成	6年 3月	高分解能3次元PET装置 SET-2400W-S 設置
		12年 3月	1億電子ボルト AVF サイクロトロン更新、ビーム加速に成功
		12年 4月	重荷電粒子ビーム多目的利用システム導入
		16年 4月	国立大学法人東北大学発足
		6月	分子イメージング棟(現コラボレーション棟)落成
		8月	東北大学百周年記念祭 小動物用超高分解能半導体 PET(Fine PET) 設置
		21年 4月	センター六ヶ所村分室発足
		21年 7月	核燃料科学研究部・放射線高度利用研究部発足
		22年 2月	サイクロトロン棟改修工事完了
		3月	小動物 PET/CT(Clairvivo PET/CT) 設置 近赤外分光法(NIRS) 光脳イメージング装置設置
		22年 5月	六ヶ所村分室開所式
		23年 1月	臨床用 PET/CT 装置 Eminence STARGATE 設置
		3月	東日本大震災
24年 10月		HM12・930サイクロトロン共同利用再開 PET 共同利用再開	
12月		小動物用超高分解能半導体 PET 復旧共同利用再開	
25年 10月		六ヶ所村分室を工学研究科に移管	
26年 4月		高齢者高次脳医学寄附研究部門 新設 管理区域入退管理システム・モニタリングシステム更新	
11月		分子イメージング研究センター(旧・研究棟)改修・開所 臨床用 PET/CT 装置 Eminence SET-3000B/X 設置	
27年 12月	仙台市営地下鉄東西線開業		

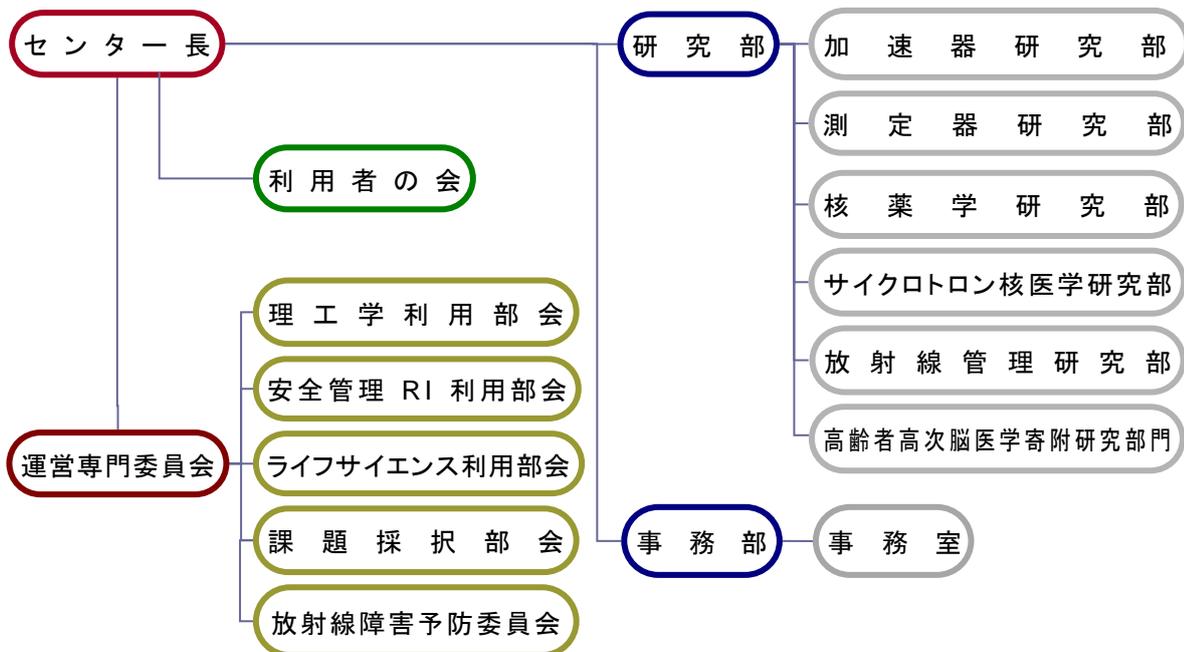
センターのあらまし

東北大学サイクロトン・ラジオアイソトープセンター(Cyclotron and Radioisotope Center、略称 CYRIC)は、サイクロトンの多目的利用、各部局では取扱い困難な高レベルRIやサイクロトン生成短寿命 RI の利用、RI 安全取扱いの全学的な教育・訓練などを行うために昭和 52 年度に設立された学内共同教育研究施設です。

本センターの利用は、理学・工学から医学・生物に至る広範な研究領域にまたがり、更に、他大学においては独立の施設であるアイソトープ総合センターをサイクロトン施設と統合して両者の有機的な運営を計っている点でも、他に例を見ない施設です。本センターの組織の概要を下図に示します。センター長は東北大学専任教授の中から選ばれ、運営専門委員会はセンター専任の教授・准教授、理事または副学長、関係部局から推薦された教授または准教授、その他から構成され、センター長が委員長となります。

加速器(理学)、測定器(理学)、核薬学(薬学)、サイクロトン核医学(医学)、放射線管理(工学)の各研究部は、括弧内の大学院研究科に協力講座として所属しています。センターにおいては、サイクロトンと RI 実験設備の共同利用や全学の RI 取扱従事者の研修に関する業務をそれぞれ分担し、施設・設備の管理・運転・保守・改善と放射線安全管理の業務および実験技術の研究・開発・指導を担い、加えて、固有の研究活動を通じて学部学生・大学院生の教育・研究を行っています。

運営専門委員会の下に置かれている理工学利用部会はサイクロトンとその周辺設備の理工学への応用について審議し、安全管理 RI 利用部会は RI 棟の利用と RI 取扱従事者の研修について、また、ライフサイエンス利用部会はサイクロトンの医学・生物学への利用について審議しています。課題採択部会は共同利用の研究課題について審議し、課題の採択やマシントイムの配分などを行います。現在、センター共同利用の課題募集は年 3 回行われています。他にセンター利用者の会があり、利用者の要望がセンターの運営に反映されるよう努力がなされています。



東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター概要

目 次

センター長の挨拶	1
1. 930 型 AVF サイクロトロン	2
2. HM12 型サイクロトロン	4
3. 高速中性子飛行時間分析装置	5
4. オンライン同位体分離装置	6
5. ゲルマニウムボール	7
6. 高分解能ビームコースおよび大型散乱槽	8
7. 大強度レーザー冷却不安定原子生成工場	9
8. 大強度高速中性子ビームコース	10
9. 半導体照射試験装置	11
10. ターゲットシャトル駆動システム	12
11. 医学・薬学利用のあらまし	13
12. PET 診断用放射性薬剤自動合成装置	14
13. 小動物用イメージング装置	16
14. PET 診断装置	18
15. PET 疾患診断研究と生体機能イメージング	19
16. PET による分子イメージング	20
17. 超高分解能(1 mm FWHM)半導体 PET	21
18. PIXE 分析装置 I :サブミリ PIXE カメラ	23
19. PIXE 分析装置 II :マイクロ PIXE カメラ、ミクロン CT	24
20. RI 実験設備と研修設備	25
21. 大型サイクロトロンからの 80 MeV 陽子線による粒子線がん治療の研究	26
22. 広報活動	27

センター長の挨拶

センターの理念

サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターは、重荷電粒子加速器サイクロトロンと短寿命・高レベルのラジオアイソトープ(RI)の多目的利用の分野における本学の研究・教育を支援するとともに、この分野の独自の研究を発展させ、教育にも直接参加し、かつ放射線とRIの安全取扱いの全学的管理と研修を行う。

本センターは、この方針に基づき、学際的研究・開発、及びこの分野に精通する人材育成を行うことによって、社会に貢献する。

センターは、本学における重荷電粒子加速器サイクロトロンと短寿命・高レベル RI の多目的利用の分野における研究・教育を支援し、かつ放射線と RI の安全取扱いの全学的教育と管理を行うとともに、自らも本分野の研究を展開し、センターにおける共同研究をリードすることを本分として、基礎的研究領域では、原子核物理学、加速器科学、放射線測定技術、サイクロトロン核医学、核薬学、放射線管理、保健物理学分野、環境・物質科学、応用研究領域では、PET 装置の開発、粒子線治療、中性子捕獲療法、新放射性薬剤等の開発を重点的に行い、これらの分野において世界最高水準の研究を展開しています。特に、理学、生命科学、工学の各々の分野におけるこの30年以上にわたる基礎研究の成果が連携し合って生まれた「医学×理工学」の研究はセンター独自の主テーマとして展開されています。

当センターが擁するサイクロトロン(K=110 MeV 大型 AVF サイクロトロンと K=12 MeV 小型 AVF サイクロトロン)、RI 研究設備、核医学研究機器(臨床用 PET 装置、動物用 PET 装置)、中性子照射装置、イオン照射装置はいずれも第1級の先端機器であるとともに、センターはサイクロトロンで生成した RI を用いた研究が出来る数少ないユニークな施設として多くの研究に活用が可能であり、民間からの共同利用申込も受け入れ、加速器の多目的応用の国内最大規模の研究拠点として位置づけていきます。

これまでの研究成果の代表的なものとして、理工系分野では、中性子飛行時間分析装置を用いたスピンと荷電状態に関する核物理学の研究、粒子ビームを用いた超微量元素分析法の開発、電磁質量分離器(EMIS)による新放射性同位元素の発見と核物理学の研究、摂動角相関測定による格子欠陥の研究、ビーム照射による核融合炉材料の研究、C₆₀ および C₇₀ フラーレン中への放射性原子の挿入、大型サイクロトロンの新制御方式の開発などがあります。一方、医学系分野では、3次元 PET の開発、PET 診断用薬剤の自動合成装置の開発、PET のがん診断応用、アミロイド・タウの分子イメージングに代表される脳神経疾患の診断研究、創薬分子イメージング、スポーツ核医学の創成などが挙げられます。

このように、センターは、放射線・加速器を用いた基礎研究とそれを基礎とした応用研究を両輪とし、さらに、様々な研究分野がお互いに協調・共鳴しあって、萌芽的、先端的な学際的研究を展開していきます。加えて、社会に開かれた研究教育、すなわち、産官学連携等に基づいた研究教育活動を行い、社会に見える貢献を行う所存です。

センター長 谷内 一彦(やない かずひこ)

1. 930 型 AVF サイクロトロン

サイクロトロンは、磁場中を円運動しているイオンを何度も加速電極を通過させることで高いエネルギーに加速する装置です。本センターのサイクロトロンは、住友重機械工業(株)製の 930 型 AVF サイクロトロン(図 1.1)で、1 億電子ボルトの加速性能を有しています。

高速に加速されたイオンは、標的の原子核と反応することで、自然界には存在しない RI を人工的に作ることができます。その能力を最大限に活用して、理学・工学から薬学・医学にわたる幅広い分野で、研究や教育、産学連携など、多目的に利用されています。

930 型 AVF サイクロトロンの主な諸元を表 1.1 に示します。本サイクロトロンは、2 つの加速電極(図 1.2)を持ち、その最大電圧は 60 kV です。イオンビームの引出半径は、923 mm です。このサイクロトロンは軽イオンから重イオンまで、様々なイオンを加速する能力をもち、これまでに水素からキセノンまでのイオンを加速しています。表 1.2 に加速可能なイオン種を示します。



図 1.1. 930 型 AVF サイクロトロン全景図

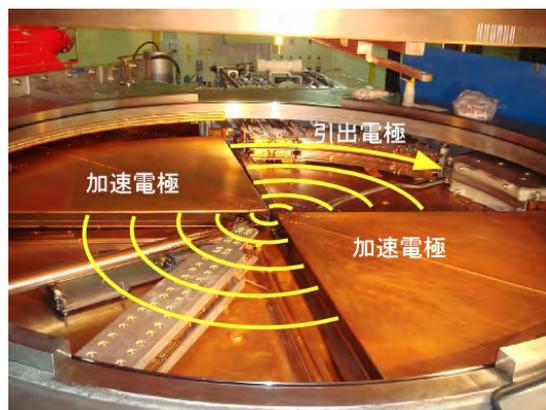


図 1.2. 930 型 AVF サイクロトロン内部

表 1.1 930 型 AVF サイクロトロンの諸元

K 値	110 MeV
引出し半径	923 mm
最大磁場	2 T
メインコイル最大電流	900 A
加速電極数	2
最大加速電圧	60 kV
加速電圧の周波数	11~22 MHz
総重量	230 t

表 1.2 加速可能なイオン種とサイクロトロンからの引出電流値

※この表は加速実績ではありません。

※最大ビーム電流は目安です。

※詳細はお問い合わせ下さい。

元素	質量数	電荷	最大エネルギー	最大エネルギー	最大ビーム電流	備考
H	1	1+	80 MeV	80.0 MeV/u	4 eμA	
He	4	2+	50 MeV	12.5 MeV/u	4 eμA	
C	12	3+	78 MeV	6.5 MeV/u	1 eμA	
	12	4+	140 MeV	11.7 MeV/u	1 eμA	
N	14	3+	67 MeV	4.8 MeV/u	2 eμA	
	14	4+	120 MeV	8.6 MeV/u	2 eμA	
	14	5+	185 MeV	13.2 MeV/u	1 eμA	
	14	6+	270 MeV	19.3 MeV/u	1 eμA	
O	16	3+	59 MeV	3.7 MeV/u	2 eμA	
	16	6+	236 MeV	14.8 MeV/u	1 eμA	
	18	3+	52 MeV	2.9 MeV/u	2 eμA	
	18	6+	210 MeV	11.7 MeV/u	1 eμA	
Ne	20	5+	131 MeV	6.6 MeV/u	2 eμA	
	20	7+	257 MeV	12.9 MeV/u	1 eμA	
Ar	40	7+	95 MeV	2.4 MeV/u	2 eμA	エネルギー下限
	40	9+	212 MeV	5.3 MeV/u	1 eμA	
	40	11+	317 MeV	7.9 MeV/u	0.2 eμA	
	40	12+	378 MeV	9.5 MeV/u	0.1 eμA	
Kr	84	13+	200 MeV	2.4 MeV/u	0.1 eμA	エネルギー下限
	84	16+	320 MeV	3.8 MeV/u	0.01 eμA	
	84	19+	451 MeV	5.4 MeV/u	0.005 eμA	
Xe	129	20+	300 MeV	2.3 MeV/u	0.005 eμA	エネルギー下限
	129	23+	430 MeV	3.3 MeV/u	0.005 eμA	

2. HM12 型サイクロトロン

HM12 型サイクロトロンは、放射性薬剤の合成に用いられる小型サイクロトロン(図 2.1)です。加速可能なイオンは水素の負イオンならびに重水素の負イオンです。これらのイオンは、サイクロトロンの中心部に置かれたイオン源で生成されます。加速された負イオンは、炭素薄膜を通過することによって電子を剥ぎ取られて陽子／重陽子に変換された後、ターゲット照射ポートへと輸送されます。そこでは原子核反応によって、表 2.1 に示すポジロン放出核種を生産しています。ポジロン放出核種は、PET 診断用薬剤に合成されます。表 2.2 に HM12 型サイクロトロンの主な諸元を示します。

表 2.1. HM12 型サイクロトロンで製造される核医学診断用ポジロン放出核種

核種	半減期	核反応	加速ビーム (エネルギー)	化学形	ターゲット
^{11}C	20.4 分	$^{14}\text{N}(\text{p},\alpha)^{11}\text{C}$	陽子 (12 MeV)	$^{11}\text{CO}_2$	$^{14}\text{N}_2 + \text{O}_2$ (0.2%)
^{15}O	2.04 分	$^{14}\text{N}(\text{d},\text{n})^{15}\text{O}$	重陽子 (6 MeV)	$^{15}\text{O}_2$	$^{14}\text{N}_2 + \text{O}_2$ (0.2%)
				C^{15}O_2	$^{14}\text{N}_2 + \text{CO}_2$ (0.2%)
^{18}F	109.8 分	$^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$	陽子 (12 MeV)	$^{18}\text{F}^-$	H_2^{18}O



図 2.1 HM12 型サイクロトロン全景図

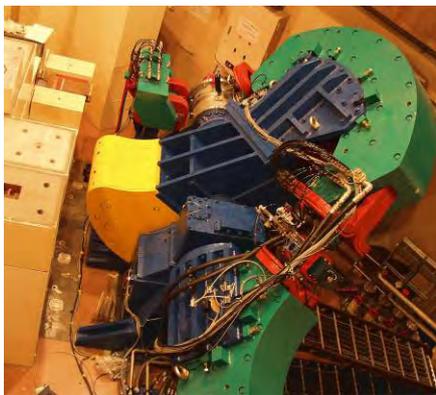
表 2.2. HM12 型サイクロトロンの主な諸元

加速イオン	負水素イオン、負重水素イオン
エネルギー(水素)	12 MeV
ビーム電流(水素)	60 μA
エネルギー(重水素)	6 MeV
ビーム電流(重水素)	30 μA
イオン源	cold PIG, 内部イオン源
大きさ	2.5×2.2×2.0 m
重量	12 t

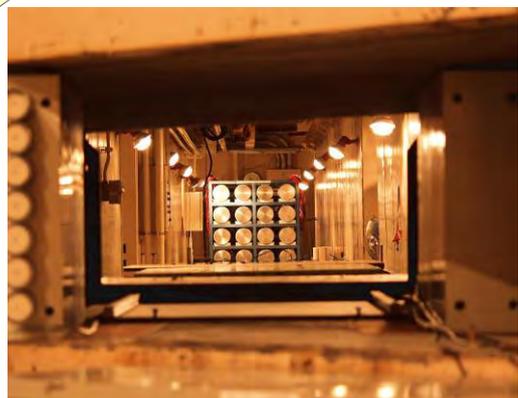
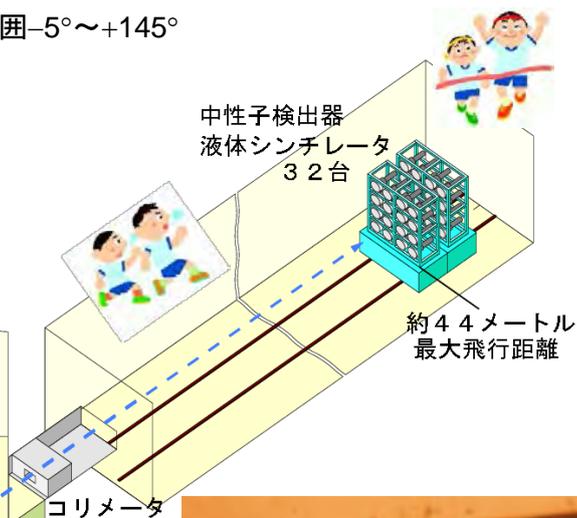
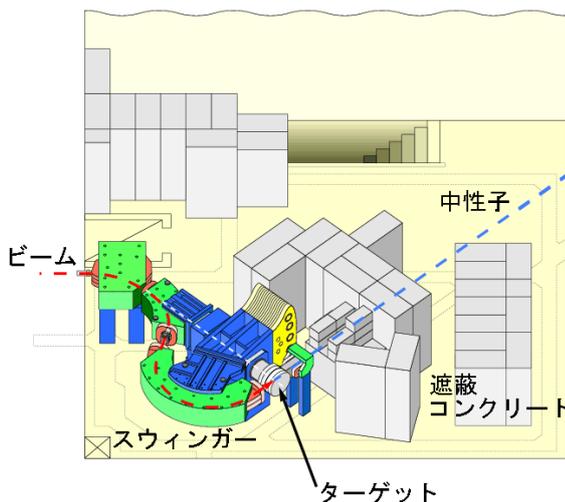
3. 高速中性子飛行時間分析装置

中性子を飛行させて、飛行時間からエネルギーを測定する装置です。1億電子ボルトでは光速の4割もの速さになるので、エネルギーを正確に求めるために、40メートル以上の距離の飛行時間を100億分の1秒の精度で計測します。

中性子は、陽子と共に原子核を構成する基本粒子です。核反応を起こした時に出てくる中性子を調べると、原子核の性質や反応の機構を知るのに非常に役立ちます。しかし中性子は電荷を持たないので、磁場で曲げたり、検出器から出る信号の大きさでエネルギーを決める事ができません。代わりに、反応が起きてから検出器に到達するまでの飛行時間を測り、速度からエネルギーを求めます。また核反応の研究では、通常、色々な角度に放出される粒子を検出器の設定角度を変えて測定します。ところが、このような飛行時間測定装置の設定角度を変更するには広い敷地が必要になってしまうので、発想を逆転し、スウィンガーと呼ばれる10トン近い重さの電磁石を回転させ、サイクロトロンから輸送されてくるビームの入射角度を変えています。



スウィンガー
回転範囲 $-5^{\circ}\sim+145^{\circ}$



コリメータから覗いた中性子検出器

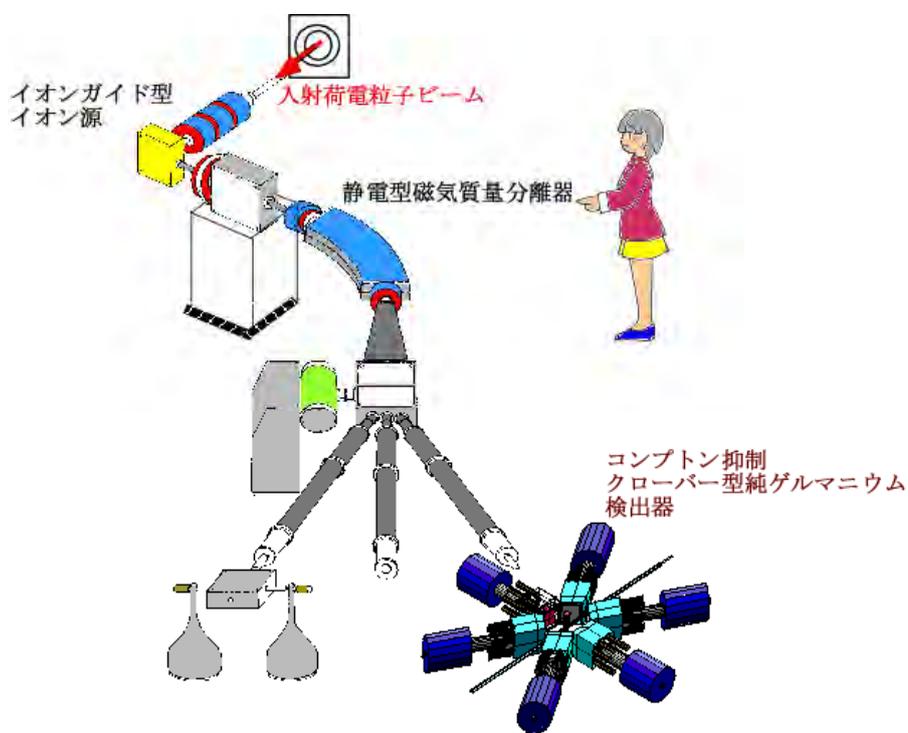
中性子飛行時間分析器の概略

4. オンライン同位体分離装置

オンライン同位体分離装置(ISOL)は、核反応によって生成された不安定同位体(RI)を質量分離して、低バックグラウンドの地点まで高速に輸送するための装置です。

サイクロトロンからのビームによって生成される RI の性質を精度良く調べるためには、同時に生成される他の RI からの放射線や中性子などに起因するバックグラウンドを軽減させることが重要です。この目的のために、テープ輸送装置を備えた ISOL が用いられています。生成された RI を ISOL で質量分離することによって、目的となる RI とは異なる質量を持つ RI を除去することが出来ます。さらに、テープ輸送装置を利用して、目的とする RI をその寿命に適した時間だけ検出部に留め置き、その後検出部から遠ざけることにより、長寿命 RI の蓄積に起因するバックグラウンドを軽減しています。これらの装置と、センター所有のコンプトン抑制クローバー型純ゲルマニウム検出器等を組み合わせることによって、低バックグラウンド環境下で核構造の精密測定が可能となります。

ISOLを用いた実験では、サイクロトロンからのビームによって生成された RI を、いかに効率よくイオン化して引き出すことが出来るかが重要な鍵となります。あらゆる元素に対して適用可能なイオン源として、高周波イオンガイド式イオン源の開発を進めており、これを用いて RI の性質を精密に測定する実験も進められています。

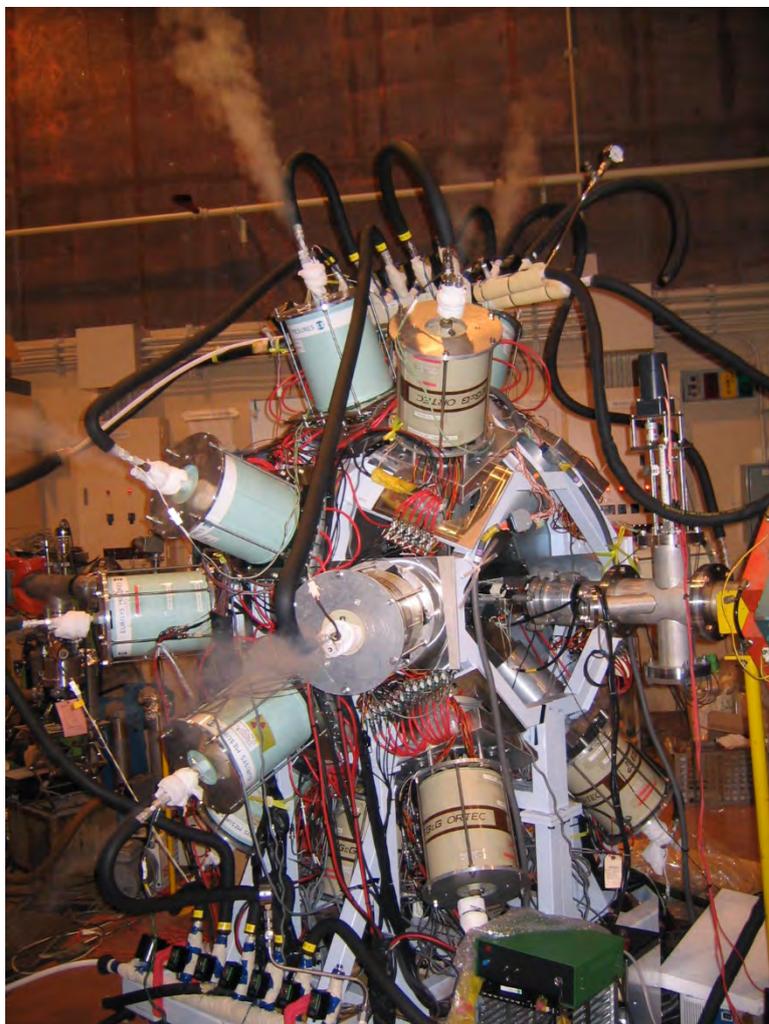


オンライン同位体分離装置の全体図

5. ゲルマニウムボール

ゲルマニウムボールは不安定核から放出される γ 線を効率よく検出するための検出器群です。

本学理学研究科では、14 台のコンプトン抑制器付き純ゲルマニウム検出器群からなるゲルマニウムボールを所有しています。この検出器群は、Hyperball と名付けられ、主にハイパー核から放出される γ 線を捕らえるために用いられ、これまでに数多くの成果を挙げてきました。この Hyperball と、センター所有の6 台のコンプトン抑制器付きクローバー型純ゲルマニウム検出器を組み合わせ、さらに巨大なゲルマニウムボール (Hyperball 2) を構築しました。この Hyperball 2 は、当センターにおけるインビーム核分光の実験や、他研究所でのハイパー核の核分光の実験に用いられています。

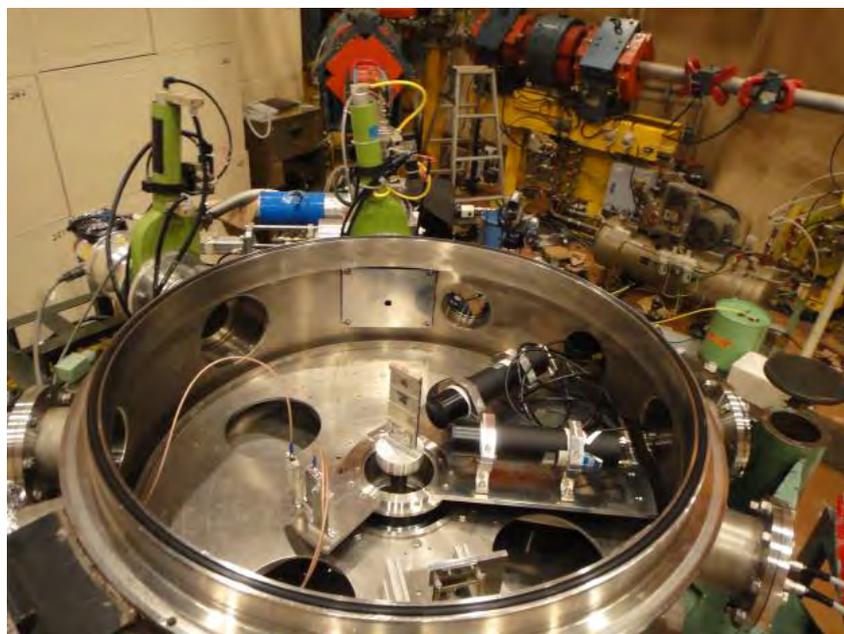


Hyperball 2 の全体写真(第 3 ターゲット室)

6. 高分解能ビームコースおよび大型散乱槽

高精度が要求される核反応散乱実験により、核構造や核反応機構の研究を行うための実験装置です。電磁石室に配置された一対の双極電磁石により、約 1/6000 のエネルギー分解能をもつビームを供給することができ、かつ、散乱実験等のビームの位置分解能が必要な実験では、標的上でビームスポットの大きさが 1 mm ϕ のビームを用いて、本加速器施設で最高のビーム分解能を駆使した精密原子核研究を推進しています。第 4 ターゲット室には、直径約 1 m、高さ 50 cm の大型散乱槽が設置されています。この散乱槽には独立して回転させることができる 2 つの駆動系をもち、真空中に半導体検出器等を取り付けて、遠隔操作により駆動することが可能となっています。また、真空を保ったままあらかじめ取り付けられた標的を交換することができる駆動系も持っています。

このコースの特徴を活かして、近年、原子核中で α 粒子が凝縮している新しい励起モードを探索する実験が行われています。通常、フェルミ粒子である核子から構成される原子核は、フェルミ統計に従います。しかしながら、この特殊な状態では α 粒子がもつボーズ粒子の性質が現れるため、一つの軌道上にいくつもの α 粒子が存在することができると言われています。つまり、フェルミ系である原子核中にボーズ系の性質が現れる、非常に興味深い状態です。このような状態を加速された酸素原子核と炭素原子核を衝突させることによって作り出し、崩壊して放出される α 粒子を測定することによって探索しています。また、理化学研究所仁科加速器センターの RI ビームファクトリおよび大強度陽子加速器施設、J-PARC で行われる実験のための検出器開発実験にも利用されています。



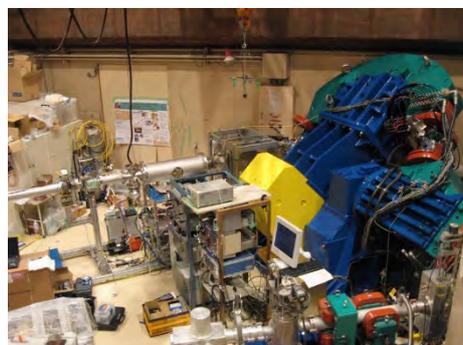
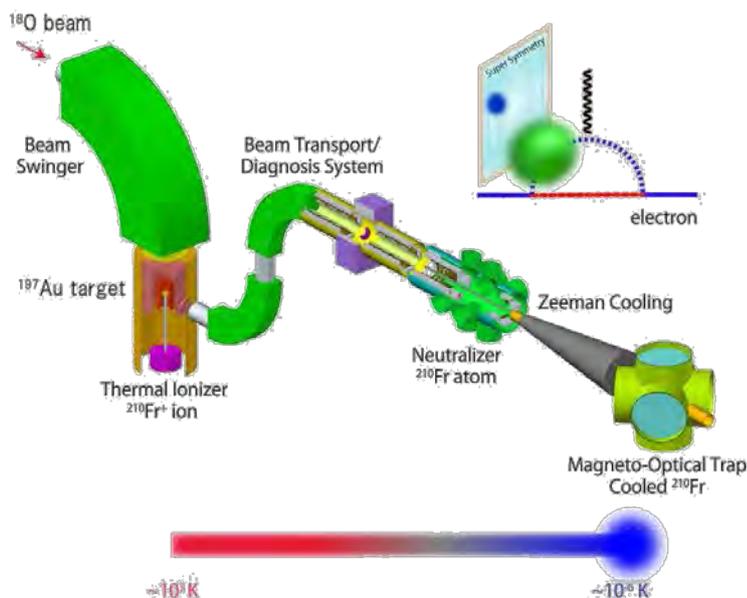
大型散乱槽内に検出器が設置された様子

7. 大強度レーザー冷却不安定原子生成工場

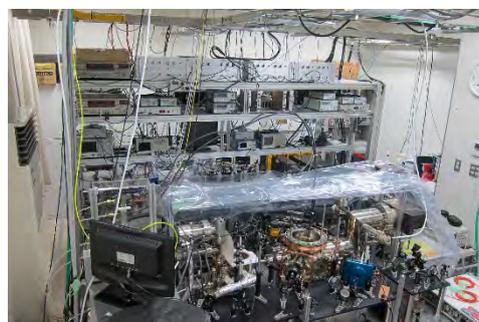
物質優勢の宇宙はどのようにして生じたのか、物質・反物質非対称性の機構解明を目指し「冷却不安定原子」を用いた電子の電気双極子能率(EDM)高精度探索を推進しています。電子のような基本粒子が EDM を持つことは、時間反転対称性の破れ、そして CP 対称性の破れを意味します。CP 非保存の源となる新しい位相角を備え、階層問題の解決やゲージ結合定数の統一等、素粒子物理学の多くの課題解決可能性を持つ標準模型を超える枠組みの有力候補である超対称性理論では、EDM は極めて自然に出現し現在の実験技術で測定可能な領域にさしかかっています。

本施設では、アルカリ原子において相対論効果により原子電荷の 3 乗に比例して最外殻電子の EDM が増幅されることに着目し、最大の電子 EDM 増幅度(895 倍)を持つ原子量最大のアルカリ原子である放射性元素・フランシウム(210Fr)の EDM 探索に着手しています。AVF サイクロトロンから供給される高強度重イオンビーム(^{18}O)と高温ターゲット(^{197}Au)による融合反応を用いたフランシウム生成用高強度表面電離型イオン源を備え、レーザー冷却・磁気光学トラップ・光トラップを行う「大強度レーザー冷却不安定原子生成工場」において、フランシウムを中核に、様々な冷却不安定原子に EDM 探索を展開し、基本対称性・基本相互作用や超対称性とその破れの機構を探るとともに、宇宙を満たす暗黒物質の正体に対して理解を深めていきます。

High Intensity Laser Cooled Francium Factory to search for electron EDM



フランシウム生成ビームライン

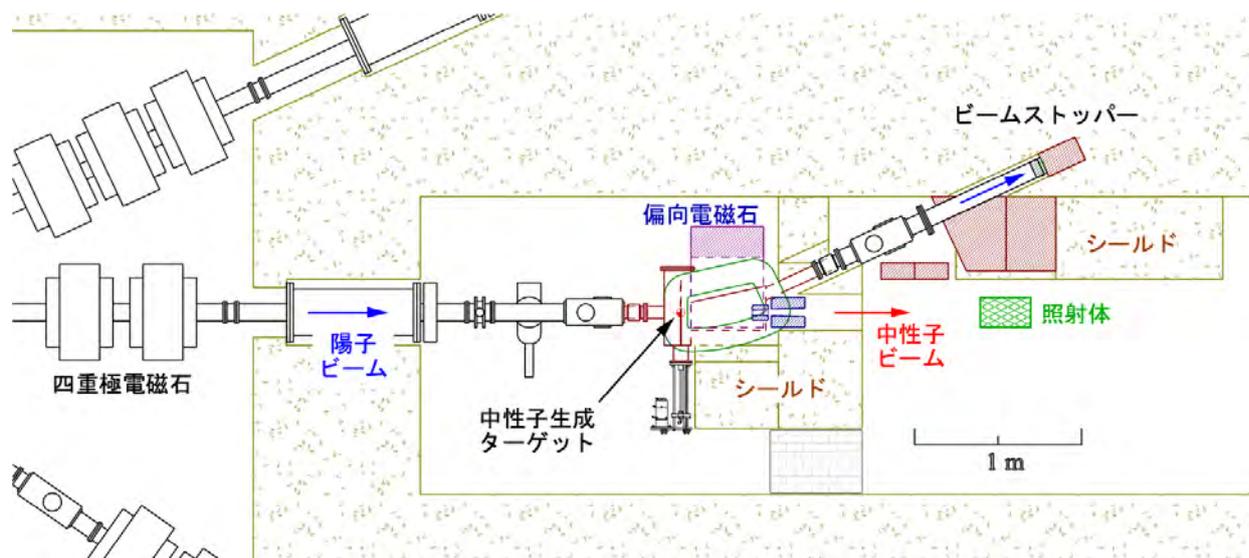


レーザー冷却・磁気光学トラップ用の光源開発

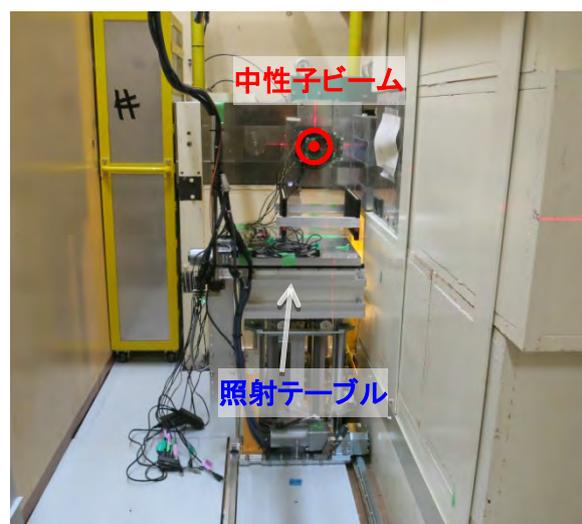
8. 大強度高速中性子ビームコース

強い高速の単色中性子ビームを生成して、集積回路の中性子に対する耐性の加速試験や、中性子で誘起される核反応の研究を行うための装置です。

半導体集積回路は線幅が10億分の1メートル以下まで微細化が進み、放射線による影響を受け易くなっています。これらは人工衛星に搭載される特殊機器ばかりでなく、日常の環境においても深刻な問題となってきます。次世代の回路では、宇宙線の高速中性子成分が最も大きな影響を与えるとされており、大強度の中性子ビームを使って誤動作の加速テストのできる施設が求められています。このコースは2005年に建設されましたが、装置の配置を工夫して中性子生成ターゲットから照射体までの距離を縮め、負イオン加速による大強度ビームと組み合わせることで、世界最高強度を達成しています。2014年に半導体集積回路の中性子耐性試験等を効率的に行うための遠隔操作可能な可動照射テーブルを新たに導入しました。



中性子生成反応 : ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$
 中性子エネルギー: 20~80 MeV
 中性子束強度 : 毎秒 10^6 個/cm²/μA
 (半値幅 1 MeV 準単色中性子ビーム)
 生成標的・散乱体間最短距離: 110 cm
 シールドは実験に応じて変更可能



中性子ビーム照射実験の様子

大強度高速中性子ビームコースの概略

9. 半導体照射試験装置

宇宙環境においては強い放射線によってコンピュータや電子機器内の半導体メモリーに誤動作(ソフトウェア)や劣化、破損がおこるため、宇宙用素子については予め試験を行い耐性を確認しておく必要があります(図 1 参照)。近年、半導体集積回路の微細化や高集積化に伴って、エラーの起こり始めるエネルギー(閾エネルギー)が低下し、発生確率も上昇する傾向にあります。前ページでも述べたように、中性子の場合は地球上においても問題が顕在化してきているため、地上における試験はますます重要になっています。

サイクロトロンからの陽子から重イオンまでの各種イオンと中性子は宇宙放射線にエネルギーが近いのでその影響を調べるのにふさわしく、当センターにもそのための照射装置が設置されています。図 2 はその模式図を示します。この装置では、サイクロトロンからのビームを左方から入射させ、末端の窓から空気中に取り出して半導体を照射します。この装置は、宇宙の放射線環境を模擬し、限られた時間内に多くのサンプルの試験を行うために、1)ビーム強度が適度(陽子の場合 $10^7 / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 、重イオンで $10^4 / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 程度)、2)ビーム強度がデバイス面上で均一、3)ビームエネルギーが可変、4)照射しながらビーム量が測定可能、となるように設計されています。1)から 3)の条件は、図 2 のようにサイクロトロンからのビームを、3 m ほど上流の薄い金箔で散乱させ、さらにビームアテネータを併用することで実現しています。また、3)は、陽子ビームの場合はデグレーダー法、重イオンの場合はカクテルビーム法を用いることで達成しています。4)には SEM (Secondary Emission Monitor: 二次放射モニター)、または改良型 SEM を用います。ファラデーカップ、デグレーダーは遠隔操作可能であり、サンプルをビーム出口付近に置いて操作ができ、半導体は XYR ステージに載せることによって、サンプル交換や異なるエネルギーで照射・測定の一連の作業をビームを止めることなく行うことができます。

当センターでは中性子による照射も可能です。それについては、前ページを参照下さい。

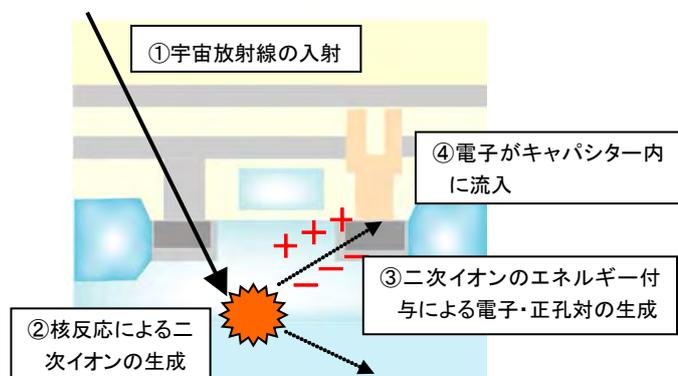


図 1. 宇宙線による半導体エラーの機構

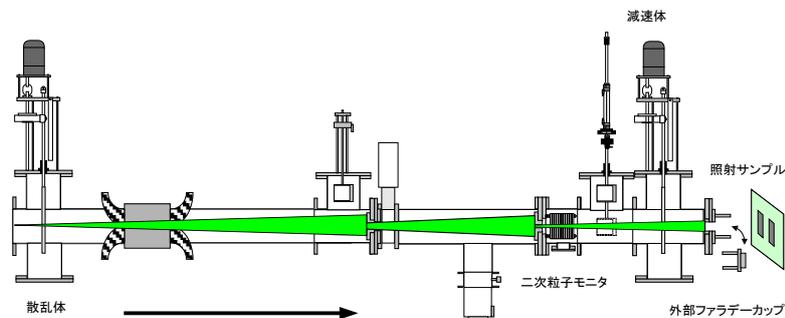
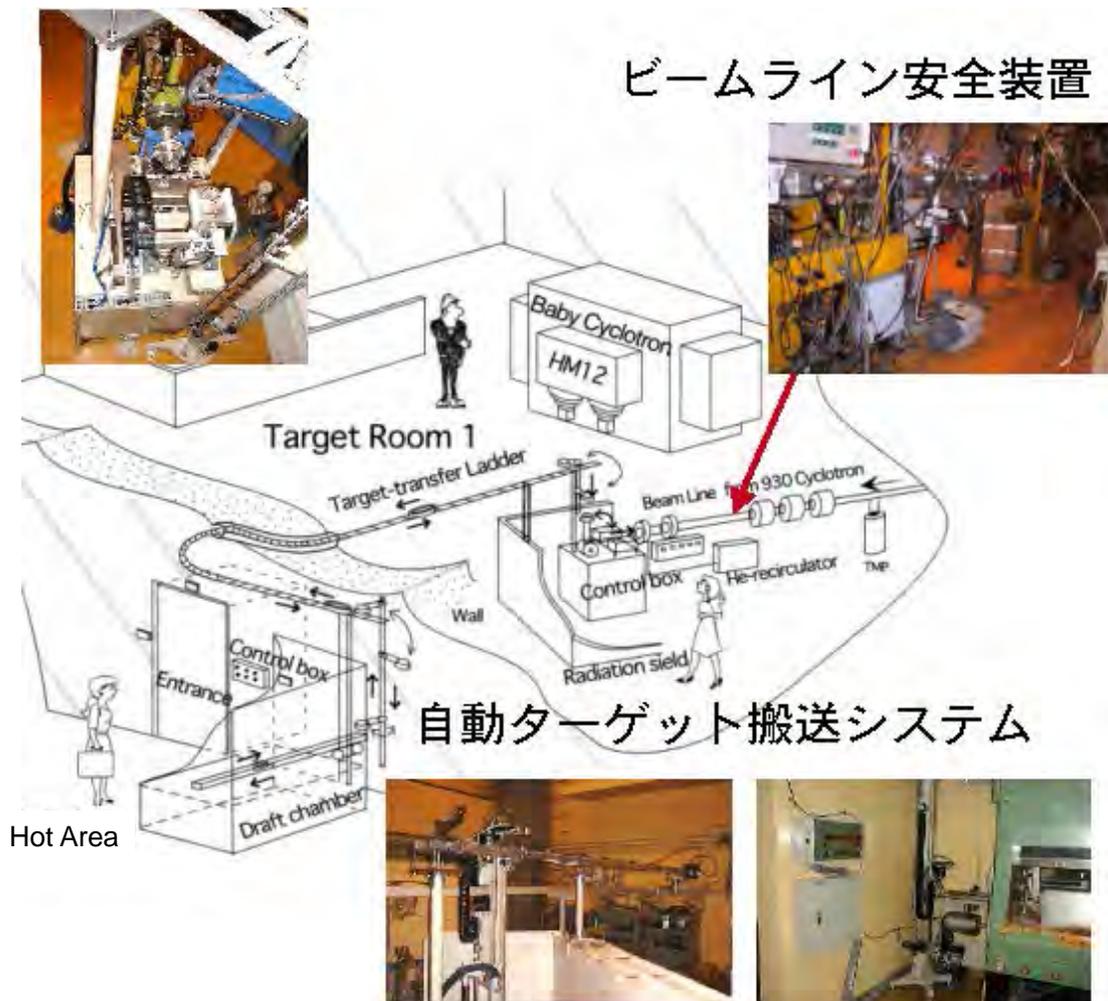


図 2. イオンによる半導体照射用ビームコース

10. ターゲットシャトル駆動システム

第一ターゲット室で HM12 型サイクロトロンが稼動していても、930 型サイクロトロンからのビームを第一ターゲット室に通して RI 製造に利用できる自動ターゲット搬入・搬出装置(シャトル駆動システム)です。このシステムは、第一ターゲット室とホットラボ室間にガイド板(回転寿司で使用されている板)を敷設して(途中の厚い遮蔽壁は直径 20 cm の S 字状ケーブルスルー穴を利用して)、この回転寿司ガイド板上にターゲットを載せたシャトルが走ります。ターゲットはホットラボ室のドラフト内でホルダーに装着し、シャトルに載せます。ボタンを押すだけで、ターゲットを載せたシャトルは自動的に回転寿司ガイド板上を走ってビーム照射位置の上で回転アームに移り、次にアームの回転・降下等の動作によりビーム照射位置まで運ばれて、シリンダーで圧着・固定されます。照射後のターゲットの回収はこの逆の動作で自動的に行われます。また、大強度ビームによる RI 製造のためのターゲット等の効率的な冷却やホイル破損時のターゲットの飛散防止対策など、さまざまな工夫が施され安全に RI の製造を行うことができます。基礎研究用の RI の製造や荷電粒子放射化分析、物性学等の研究になくてはならないものとなっています。

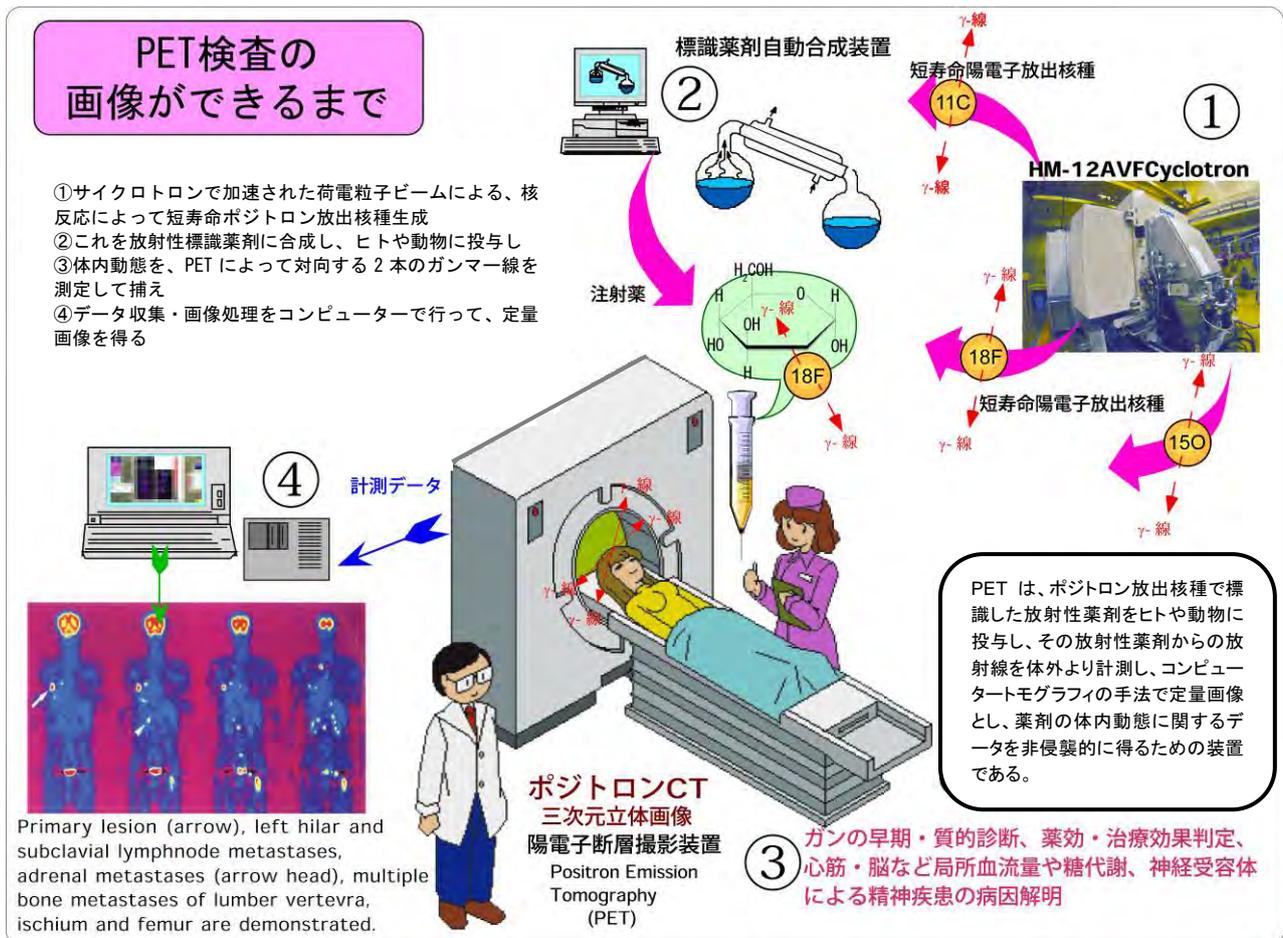


11. 医学・薬学利用のあらまし

PET 検査は最近よく知られるようになりました。がん、脳、心臓などの検査がよく行われますが、CYRIC では 20 年以上前から検査の有用性についての研究を行ってきました。ここで PET 画像ができるまでのおおまかな手順を説明します。

まずは①サイクロトロンを用いて短寿命ポジトロン放出核種の炭素 11 (^{11}C)、酸素 15 (^{15}O)、フッ素 18 (^{18}F) が作られます。②短寿命ポジトロン放出核種は標識薬剤自動合成装置に送られて放射性薬剤が合成されます。注射薬は人体に投与しても安全かどうかを毎回検定されています。③検定が完了した薬剤は PET 検査室に送られ、注射器に移し替えられて患者さんに投与されます。注射された薬剤は体内を循環したのち検査対象となる臓器 (たとえば脳) に集積しますが、脳から放出される γ 線の強さと時間的・空間的な変化を PET 装置で撮影します。④得られたデータは画像処理用コンピュータに転送され画像を作製します。最後に、得られた人体画像を解析して、医学的な情報を取り出します。

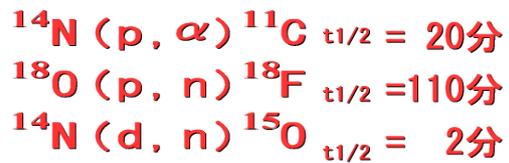
その他、臨床研究以外にも、動物を使った基礎研究、より高精度の測定を行うための新しい装置の開発や、ノイズの少ない高品質画像を作るためのソフトウェアの開発も行っています。



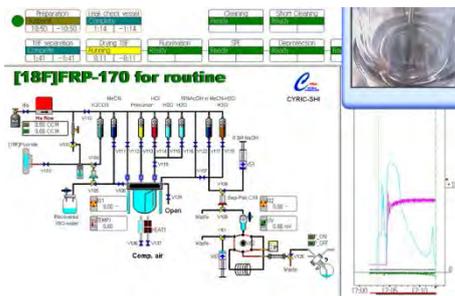
12. PET 診断用放射性薬剤自動合成装置

サイクロトロンで製造された短寿命のポジトロン放出核種を使用し、陽電子断層撮影装置 (PET) による核医学診断利用を目的に種々の放射性薬剤の合成を行っています。この診断用放射性薬剤の調製を作業者が被曝することなく行うため自動合成装置を使用します。

標識合成—HM12 サイクロトロンで製造されたポジトロン放出核種はチューブを通して迅速に輸送され、遮蔽容器 (ホットセル) に納められた自動合成装置により種々の有用な放射性薬剤へと化学合成 (標識合成) されます。ルーチンな医学診断利用を目的とするため、コンピュータ制御による完全な自動化で再現性の良い合成が行われています。また、自動合成のためには合成操作に関して様々な工夫がなされています。下図にはその一例として ^{18}F -FRP-170 (^{18}F -標識 FRP-170) の合成法と自動合成装置を示します。



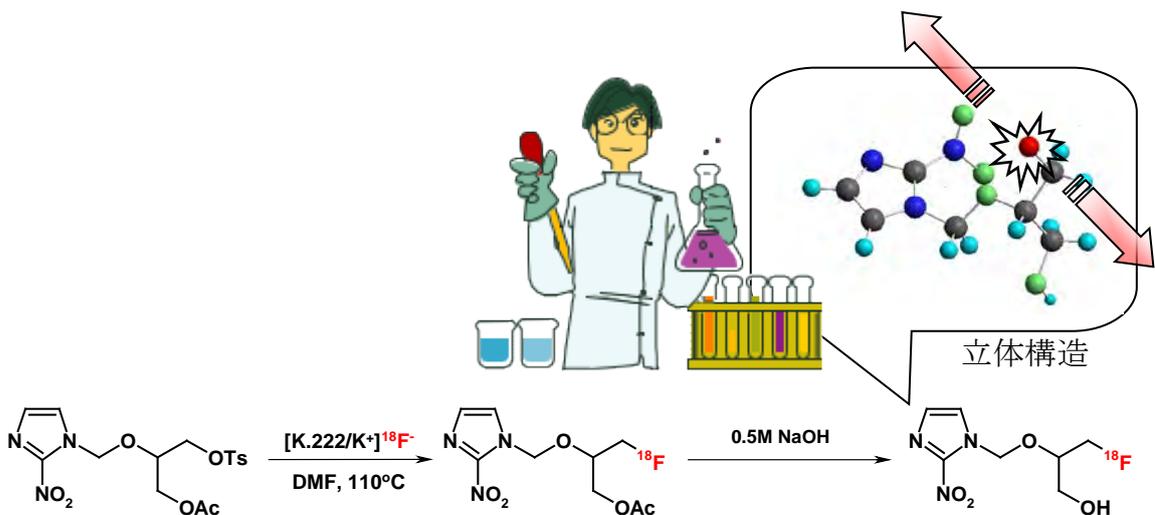
ホットセル



^{18}F -FRP-170 合成操作画面

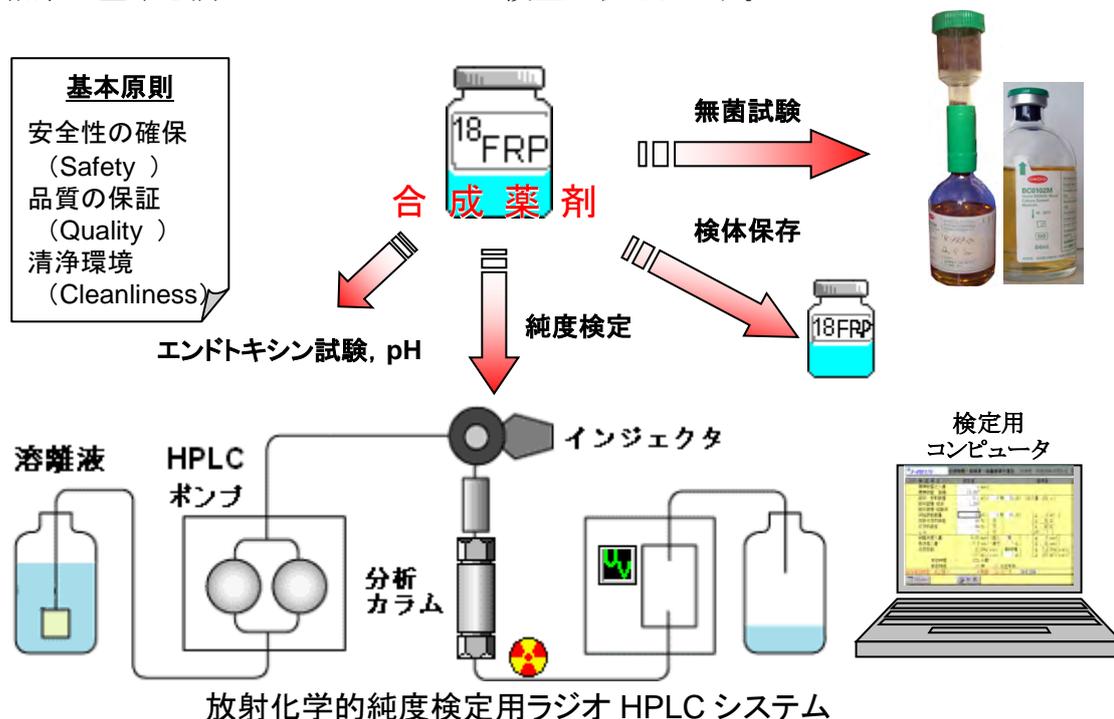


^{18}F -FRP-170 自動合成装置



^{18}F -FRP-170 (低酸素細胞イメージング剤) 合成反応式

品質検定—診断用注射薬として人に投与される放射性薬剤には、多くの品質基準を満たすことが要求されます。製造される薬剤は寿命が短いため、迅速にその pH、純度、無菌性等が検定され、これらの結果が基準を満たしてはじめて PET 検査に供されます。



以上のような工程を経て、がん診断用の ^{11}C -標識メチオニン、 ^{18}F -FDG (^{18}F -標識フルオロデオキシグルコース)、 ^{18}F -FRP-170 や、脳の高次機能検査やアルツハイマー病の診断用の種々の標識薬剤 (^{18}F -THK-5117/-5351、 ^{11}C -BF-227、 ^{11}C -ドキセピン、 ^{11}C -ラクロプライド、 ^{11}C -ドネペジル)、および ^{15}O -標識水が安全に合成・調製され、PET による臨床研究に利用されています。新しい放射性薬剤の開発—当センターでは上記に挙げたルーチンな薬剤製造の他に新しい放射性薬剤の開発も行っています。例えば ^{18}F -FDG は腫瘍検出に優れていますが、尿排泄されてしまうため腎臓、膀胱の腫瘍には不向きです。そのような欠点を補う目的で新たな腫瘍診断薬の開発や分子レベルでの動きを画像化する分子イメージングプローブの開発に取り組んでいます。候補化合物が選定された後、ポジトロン核種による合成反応条件(時間、温度、濃度等)や分離・精製条件を検討し、標識合成を行います。

新たに開発された放射性薬剤は PET 薬剤としての有用性を動物を用いて評価します。ここで有用性が認められるとその薬剤の自動合成法を確立して、種々の安全審査を行い臨床薬剤として承認されます。

上記の内容についての詳しい情報は以下のウェブページの研究紹介をご覧ください。

<http://kakuyaku.cyric.tohoku.ac.jp/index-j.htm>

13. 小動物用イメージング装置

当センターには、ポジトロン放出核種で標識された薬剤を用いてマウスやラットなどの小動物を非侵襲的に観察することができる専用のイメージング装置が設置されています。小動物用 PET が 2 台、小動物用 CT が 1 台、プラナーイメージング装置が 1 台です。

それぞれの特徴について紹介します。

・FINE-PET

工学研究科の石井グループが開発した PET で検出器に半導体である CdTe(カドミウムテルル)を使用しています。視野中心の空間分解能は 0.78 mm です。検出器の体軸方向視野は 26 mm、断面内視野は 60 mm です。脳の微細構造や小さな病変をイメージングするのに適しています。RI 棟 1 階動物 PET 装置室に設置されています。詳細については本パンフレット 21 ページを参照ください。

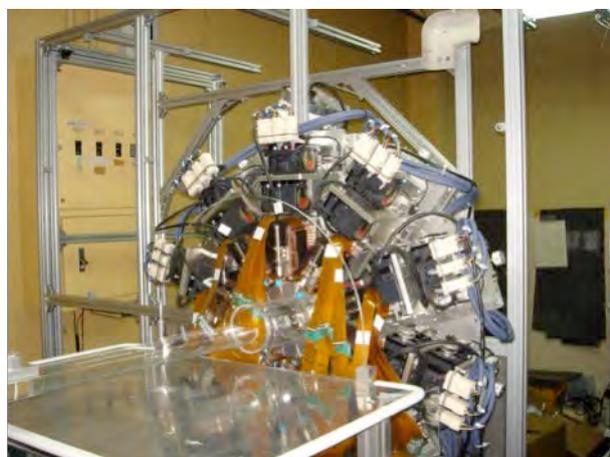


図 1. FINE-PET

・Clairvivo-PET

(株)島津製作所製の小動物用 PET で、検出器に 3 次元放射線検出器(DOI:Depth of Interaction)を搭載しています。シンチレーターには LYSO 結晶を使用し、視野中心で感度は 8%以上、空間分解能は 1.5 mm です。検出器の体軸方向視野は 151 mm。断面内視野は 100 mm であり、ラットの全身撮影やマーモセットの撮影にも対応可能です。

・Clairvivo-CT

(株)島津製作所製の小動物用 CT で 1 回の撮像で 3 次元画像を構築できるコーンビーム再構成法と、撮像視野の大きいオフセット撮影法を採用することで断面内視野として約 38~110 mm までの実験小動物が撮影可能となっています。体軸方向の視野は 1 スキャンで最大 50 mm、マルチスキャンを行うことで最大約 300 mm まで撮影可能、さらに等倍から 3 倍程度まで視野を拡大することが可能であり関心のある部位を詳細に観察することが可能です。

得られた画像は、オリジナル断面の他、任意断面(オブリーク画像、ダブルオブリーク画像)で

高速に表示できます(MPR 機能)。画像データを DICOM 形式で出力できることから PET との画像重ね合わせ(フュージョン)が容易に行えます。RI 棟 3 階物理実験室に設置されています。



図 2. Clairvivo-PET(手前)と Clairvivo-CT(奥)

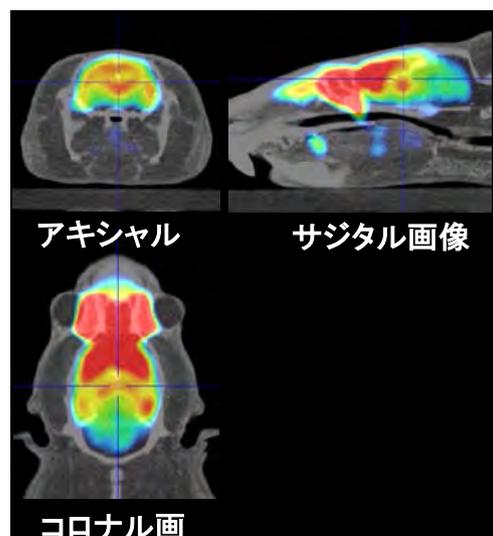


図 3. FDG-PET 画像と CT 画像の重ね合わせ例

・プラナーイメージング装置

(株)浜松ホトニクス社製のプラナーイメージングシステム PINK-5000 は、PET による断層イメージとは異なり、焦点面上の平面イメージとして測定されますが、時間分解能に優れており、小型/広視野/高感度/高分解能/ハイスループットの特長を持っています。少量のポジトロン放出薬剤で測定可能であり、5 秒間隔のリアルタイム測定が可能となっています。RI 棟 3 階共同利用実験室(5)に設置されています。



図 5. PINK-5000

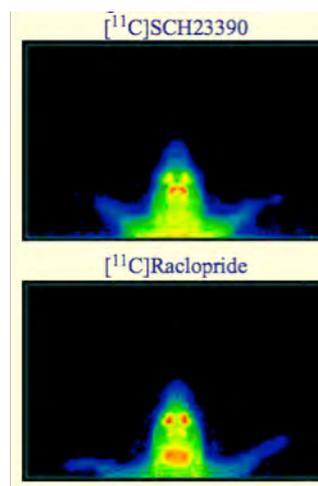


図 6. ドパミン受容体のプラナー画像

14. PET 診断装置

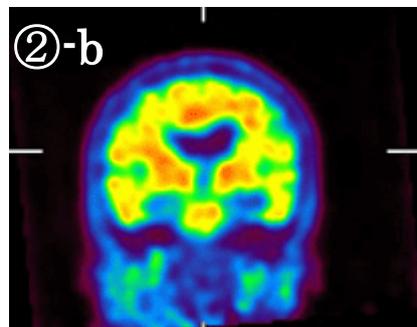
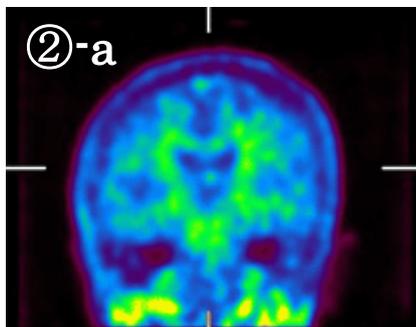
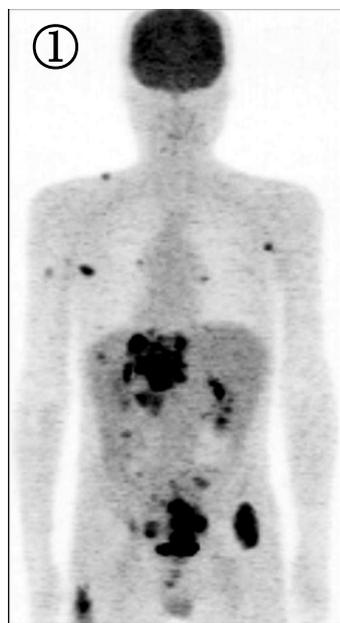
臨床用 PET 装置は人体に投与された陽電子放出核種で標識した放射性薬剤から発生する γ 線を 3 次元的に計測し、薬剤の分布や動態を画像化するための装置です。本センターでは臨床研究のために東北大学病院出張診療所を設けて装置を設置し、センターで研究開発された陽電子放出核種標識薬剤の人での有効性の確認やそれらの薬剤を用いた人疾患等に対する臨床応用研究を行っています。現在、臨床用 PET 装置として PET 専用装置の Eminence SET-3000B/X と PET/CT 装置の Eminence STARGATE (共に島津製作所製) の 2 台を使用しています。



PET 専用装置 Eminence SET-3000B/X



PET/CT 装置 Eminence STARGATE



臨床用 PET 装置で撮像された人体画像

- ① 放射性薬剤 ^{18}F -FDG による悪性黒色腫の全身画像。病巣が体幹部の黒い部分として描出されている。
- ② 放射性薬剤 ^{11}C -PiB による (a) 健常人の脳画像と (b) 認知症患者の脳画像。患者の脳全体に高い集積(オレンジから黄色の部分)が見られる。

15. PET 疾患診断研究と生体機能イメージング

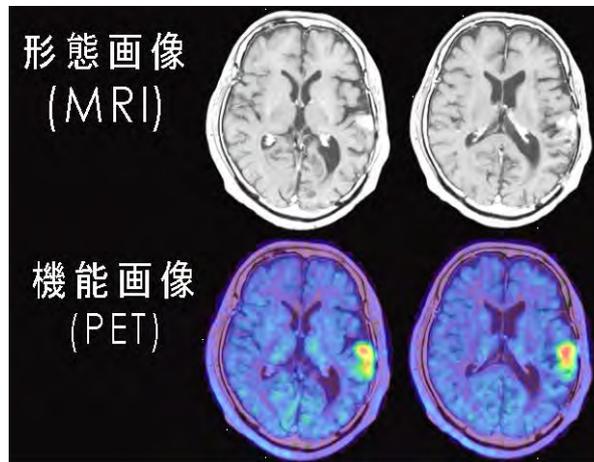
PET は、CT や MRI といった身体臓器の形を撮影する「形態画像」とは違い、血流やブドウ糖代謝のような臓器の機能・活動そのものを画像化する方法で、「機能画像」とよばれます。PET では薬剤をとりかえることで全く異なった生体機能の情報が得られるのが大きな特徴です。がん細胞や筋肉のエネルギー消費量やアミノ酸消費量、酸素消費量、脳内の神経伝達機能など、人体の細胞・組織の活動を生きたままの状態を観察できることが重要な特徴です。

ブドウ糖の消費量を測定するための薬剤 ^{18}F -FDG を用いた PET 検査は、主にごん検査として 2004 年度から保険が適用されるようになり、PET 検査ができる病院はどんどん増えています。 ^{18}F -FDG は、がん検査以外にも、脳や心臓、全身の筋肉のエネルギー消費量を測定する目的にも使用され、運動時の筋活動や、がん患者の心理的な変化といった、新しい分野の臨床研究も進められています。

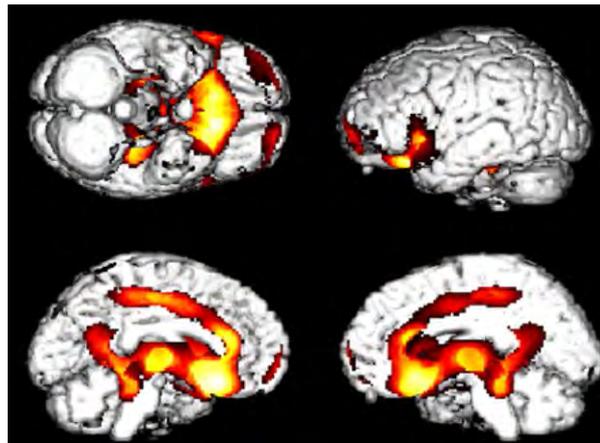
PET画像 紹介



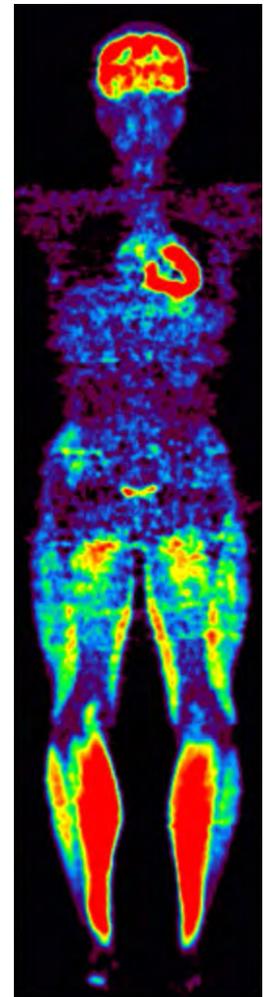
大腸癌肺転移の PET 画像 (^{18}F -FDG)



形態画像 (MRI) と位置合わせをおこなった脳腫瘍の PET 画像 (^{11}C -メチオニン)



多くのがん患者において観察された脳活動低下部位 (^{18}F -FDG)

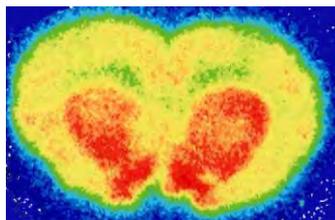


ランニング時の全身糖代謝測定 (^{18}F -FDG)

16. PETによる分子イメージング

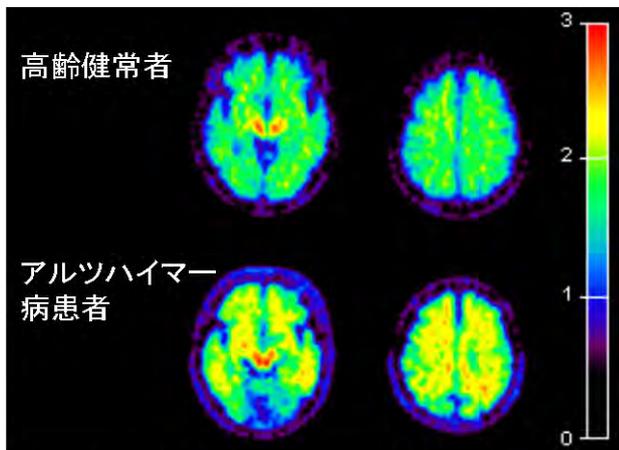
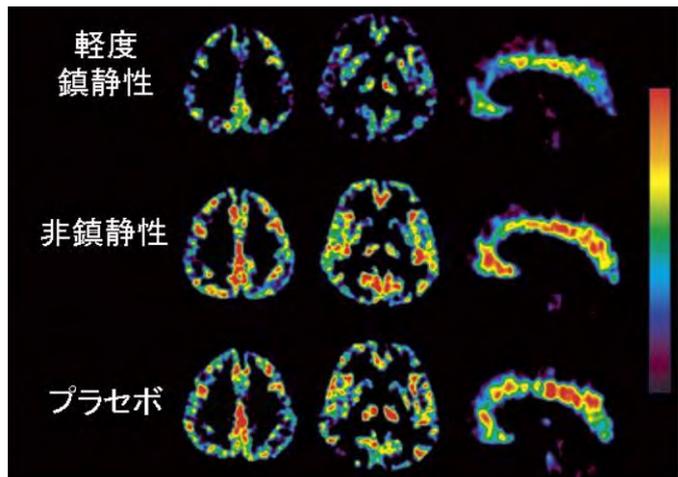
私たちの脳を形作っている神経細胞は「伝達物質」を放出して他の神経細胞にメッセージを伝えています。放出された伝達物質のメッセージは、隣の神経細胞の表面の「受容体」が受け取り、その細胞の活動を調節しています。このような調節機構のおかげで私たちの「精神—こころ」が一定の状態に保たれているのです。神経伝達物質には、ドーパミン、セロトニン、アセチルコリン、ヒスタミンなどいろいろな種類がありますが、それぞれ脳内での役割が異なっています。PETをうまく使うことで、体内のごく微量な伝達物質や受容体など「生体内分子」が活動する様子を体外から、しかも生きたままの状態を観察することができます。病気による目に見えない変化を診断したり、内服した薬が体内でどのように作用するかを調べることもできます。こうした研究領域は最近、「分子イメージング」とよばれ、世界中で活発になっています。

当センターでは、運動と脳内ドーパミンの関係や、抗ヒスタミン薬(花粉症の治療薬)の眠気を科学的に評価する研究、アセチルコリン神経に作用する薬剤の研究、低酸素状態の細胞を発見するための研究、アルツハイマー病早期診断用薬剤の開発などいろいろな研究が活発に進められています。こうした医学的な応用研究は、医学系研究科や先進医工学研究機構などとの学内共同利用事業や放射線医学総合研究所との連携事業などに基づいた共同研究として推進されています。



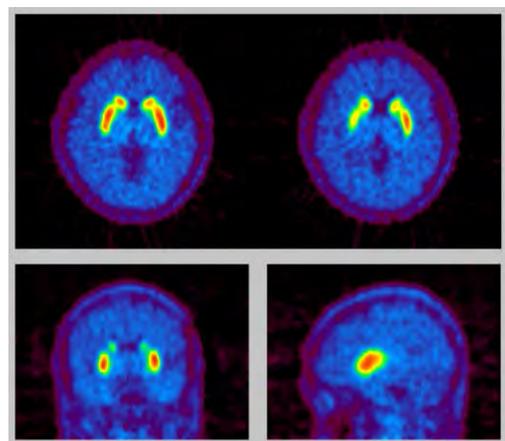
アセチルコリン分解酵素阻害薬(^{11}C -ドネペジル)の脳内分布(ラット)

花粉症治療薬(抗ヒスタミン薬)は脳のヒスタミンH1受容体をブロックして眠気を誘発します。薬の鎮静作用の強さをPETで比較・評価することができます→(^{11}C -ドキシセピン)。



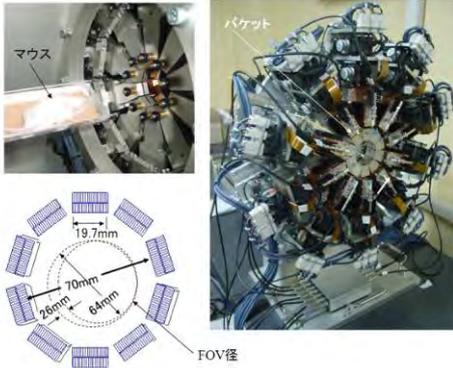
高齢健常者
アルツハイマー病患者

アルツハイマー病の進行とともに増えるアミロイドの蓄積量を示すPET画像。

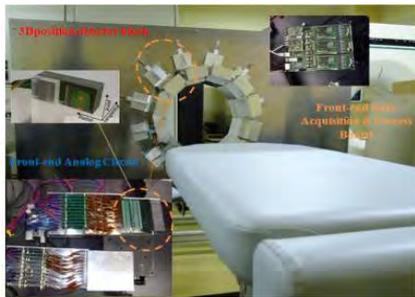


ヒトの脳におけるドーパミン分泌の様子を示すPET画像(^{11}C -ラクロプライド)

17. 超高分解能(1 mm FWHM)半導体 PET



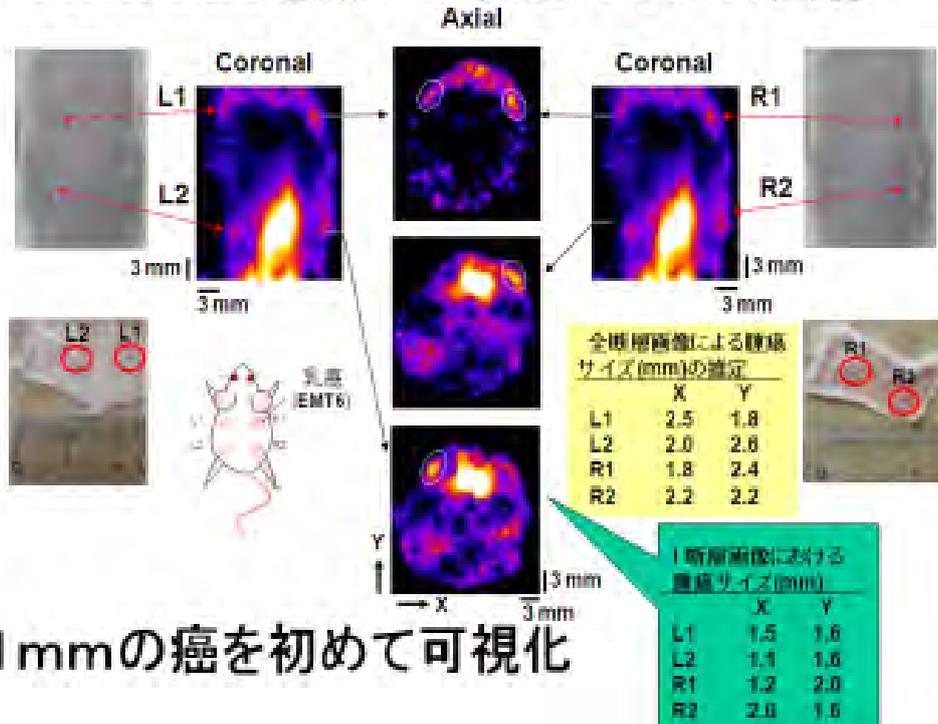
0.78 mm FWHM の Fine PET

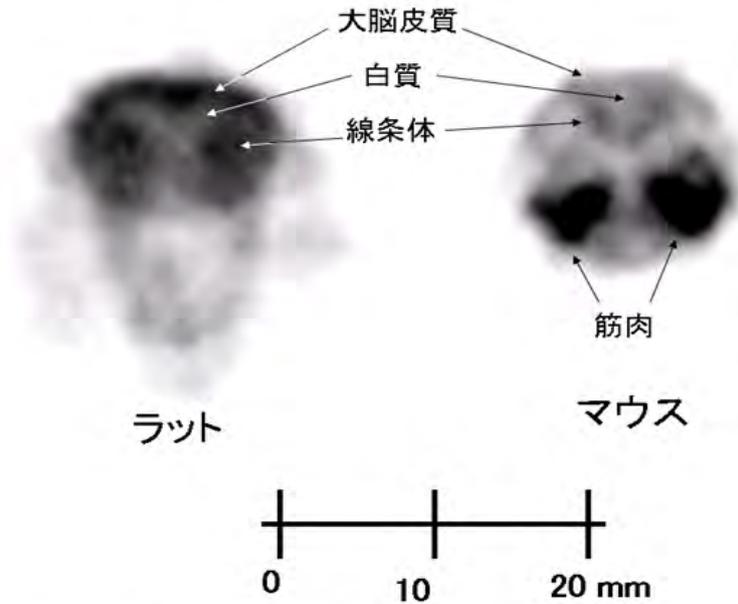


ヒト用超高分解能半導体 PET

陽電子放出核種から発生する陽電子の飛程は、水中で最大数 mm もあります。このため、PET の分解能は 1 mm FWHM 以下にならないと思われていました。ところが、実際には、陽電子の物質中でのエネルギー損失と微分体積を考慮すると ^{18}F などでは、0.2 mm FWHM の分解能が見積もられます。2 ガンマ線の角度揺動効果を入れても 1 mm 以下の分解能が期待できます。ただし、検出器の大きさは、1 mm 程度の小さな検出器でなければなりません。我々は、CdTe 検出器を用いて、1 mm 以下の空間分解を持つ実用型小動物用 PET (Fine PET) を世界で初めて開発し、1 mm の大きさの癌の FDG 画像の取得に成功しました。現在、生命科学の研究に利用されています。さらに、ヒト用の超高分解能 PET が現在、調整中で今後、脳の高次機能等の研究に利用されます。

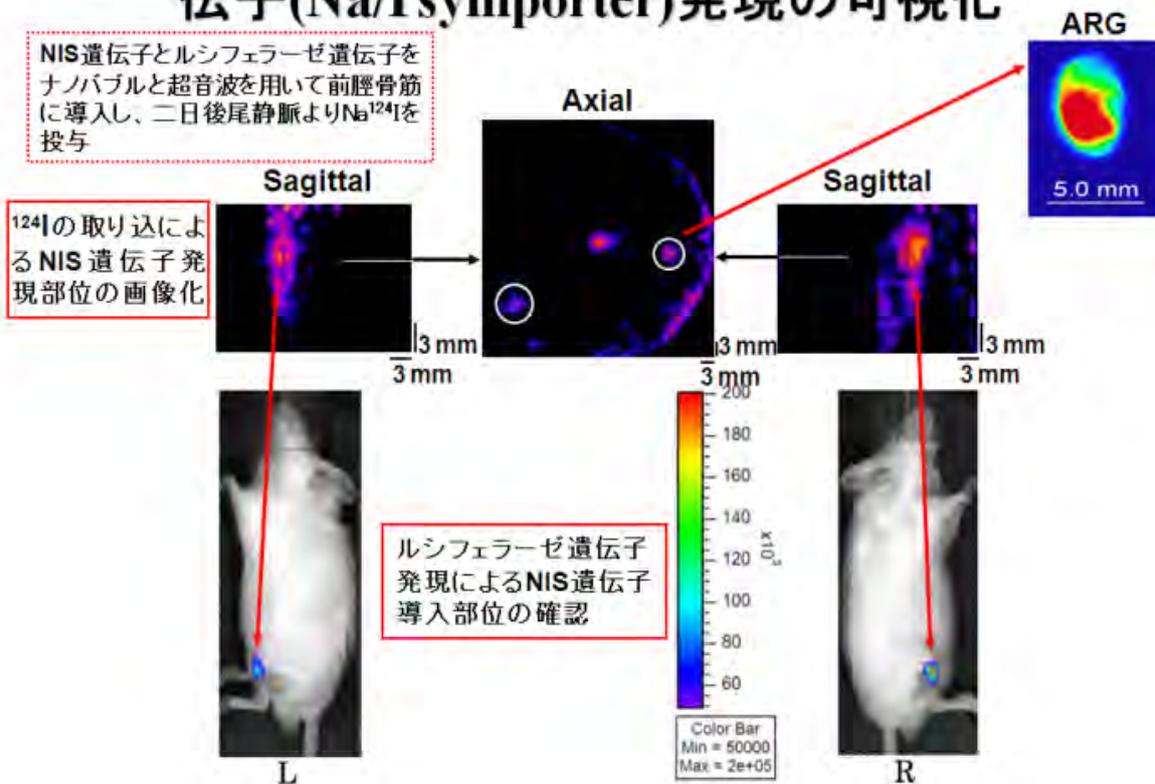
FINE-PETを用いた担癌マウスの画像





Fine PET での FDG 画像(ラット、マウス)
 マウスにおいては、FDG 投与後、顎の運動のために筋肉に FDG が集積した。

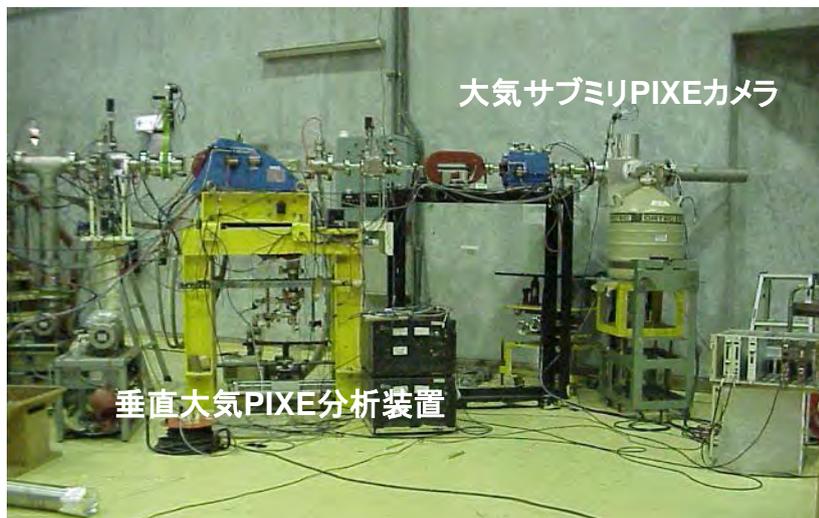
FINE-PETを用いたマウス骨格筋のNIS遺伝子(Na/I symporter)発現の可視化



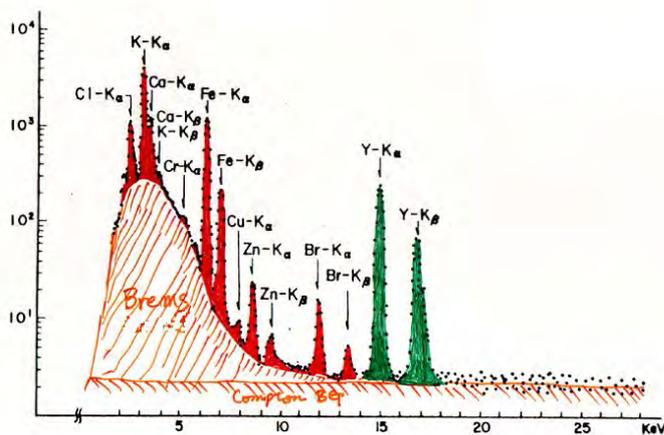
18. PIXE 分析装置 I : サブミリ PIXE カメラ

物質にイオンを照射すると、物質固有のエネルギーを持った X 線つまり特性 X 線が発生します。この X 線の発生断面積は非常に大きいので、極微量な元素を検出できます。この原理に基づいた元素分析法は PIXE (Particle Induced X-ray Emission) 分析法と呼ばれています。センターでは、工学研究科量子エネルギー工学専攻との連携協定の下、この PIXE 分析法の共同利用を行っています。現在、以下の分析方法が共同利用に供されています。

- 1) 生体試料の分析; $Z=11\sim 92$ までの元素の 1 ppb までの分析が可能。
- 2) エアロゾル、環境試料のような多量の試料の分析。
- 3) 考古学試料などの非破壊表面元素分布分析 (サブミリ PIXE カメラ)。

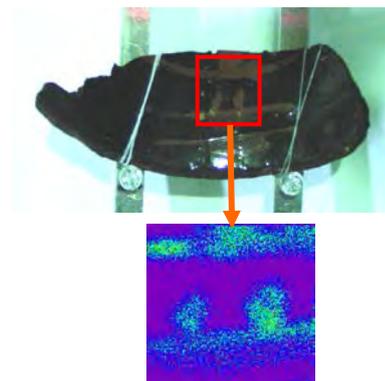


PIXE分析コース



ヒトの血液のPIXE分析によるX線スペクトル

日本におけるPIXE分析の開発は、
東北大から始まった。



Hgの検出とその分布

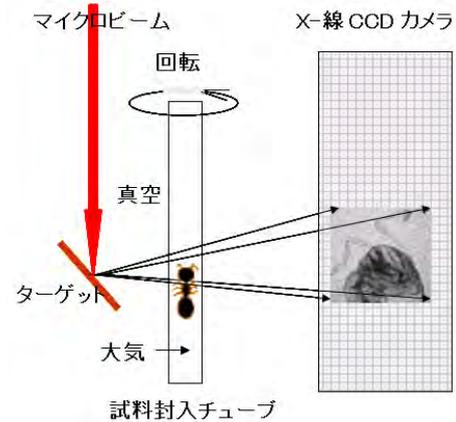
仙台城からの出土品の
サブミリPIXEカメラ分析

19. PIXE 分析装置Ⅱ：マイクロ PIXE カメラ、ミクロン CT

ミクロン径まで収束させた粒子ビームで試料表面上を走査し、微小領域をミクロンの空間分解能で PIXE 分析を行うと、微小領域の元素分布の画像を得ることができます。この原理に基づいた分析装置をマイクロ PIXE カメラと言います。この装置を用いると細胞の中の元素分布を調べることができます。

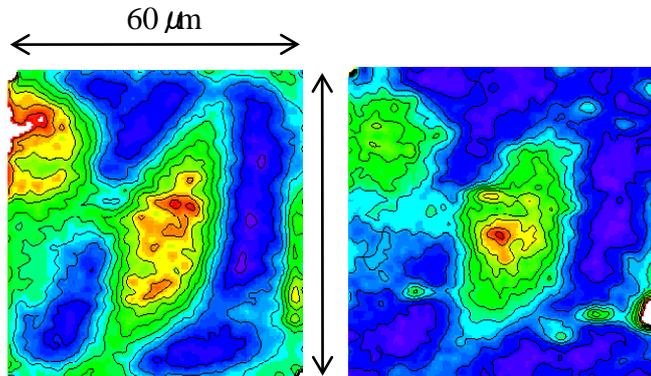
さらに、ミクロン径のビームを金属ターゲットに当てると、特性 X 線の点線源ができます。これを用いると、ミクロンの空間分解能を持った CT 画像が得られます。この原理に基づいた CT をミクロン CT と言います。

これらの装置も共同利用に供されています。

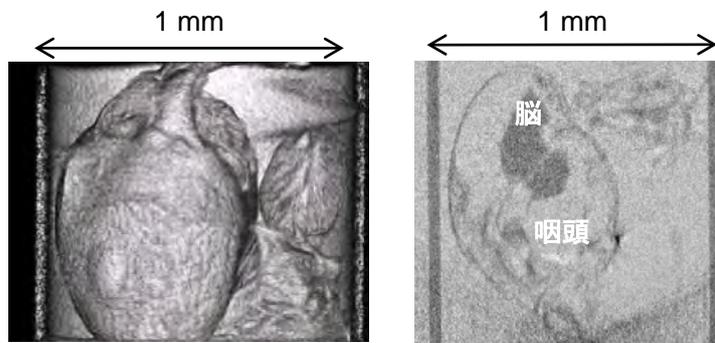


マイクロビームライン

ミクロンCT



牛の内皮血管細胞内のイオウの分布(左)とリンの分布(右)



山蟻の3次元CT画像(左)と断層画像(右)

20. RI 実験設備と研修設備

RI 棟には、密封及び非密封の RI を用いた実験用の設備が用意され、研究実験と放射線安全取扱講習や学生実験に利用できます。当センターでは、各部局では困難な多種の RI の利用や RI を用いた小動物実験が可能となっています。また、 γ 線と中性子に対する線量計及び計測器の校正のための照射場も整備されています。

1. 利用可能な RI: 購入した RI 及びサイクロトロンで生成した RI
RI 棟 574 核種、サイクロトロン棟 1000 核種、研究棟 27 核種
2. 研究設備: 共同利用実験室 14 室、理工学～ライフサイエンスの各分野で利用可能
3. 実験機器: 各種放射線計測機器・ γ カウンター、液体シンチレーションカウンター、イメージングアナライザー、Ge 半導体検出器、 2π ガスフローカウンター、 α/β 線自動測定装置、動物飼育・実験用設備
4. 照射場: γ 線照射装置 ^{60}Co (1.48 GBq, 185 MBq)、 ^{137}Cs (3.7 GBq)、校正用高精度電離箱
中性子校正場 ^{252}Cf 線源単体及び減速材付きでの校正が可能
5. 研修設備: 非密封 RI 取扱用フード・実験台・流し×16
NaI(Tl)・GM カウンター、サーベイメーター、電子回路、吸収・遮蔽板等
(16 組)
6. 動物飼育設備: ラット・マウス用 3 機



非密封 RI 実験用フード

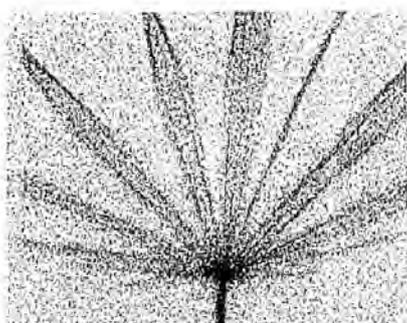
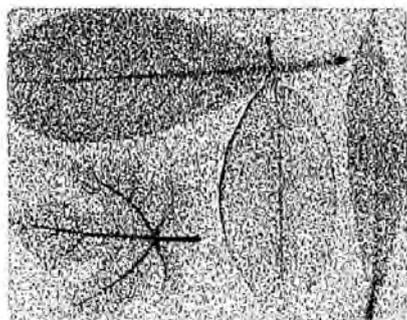


図 12 木の葉に含まれる放射能の分布像



バイオイメージングアナライザー(右)とそれによる植物中放射能分布画像(左)

21. 大型サイクロトロンからの 80 MeV 陽子線による粒子線がん治療の研究

基礎研究用の粒子線治療装置

陽子や炭素線などの荷電粒子ビームが物質に入射すると、ブラッグピークと呼ばれる線量分布を形成し、停止する直前で最大の線量を物質に付与します(図 1)。粒子線治療はこの特徴をがん治療に応用した新しい放射線治療で、従来の X 線による治療よりも正常組織への影響を少なくすることができます。CYRIC では粒子線治療装置(図 2)を開発し、大型サイクロトロンからの陽子線を用いて、照射技術、ビームモニター等の研究開発や、陽子線治療の基礎研究を行っています。本治療装置より、マウスから小型犬までの小動物に対応した照射野と各種拡大ブラッグピーク(SOBP)の治療用陽子線が得られます(図 3)。

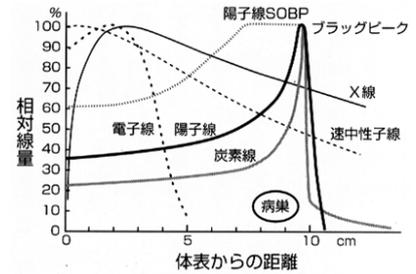
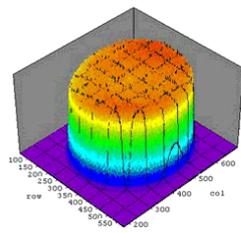


図 1. 各種放射線の深部線量分布



図 2. 水平照射型の基礎研究用粒子線治療



Collimated proton field

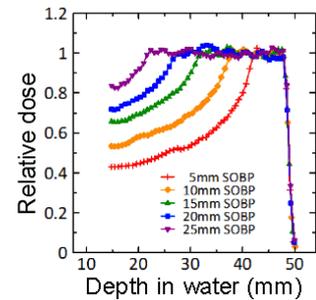


図 3. 一様強度の照射野(左)と各種 SOBP(右)

粒子線治療の研究紹介

陽子線は X 線よりも線量分布は優れていますが、細胞に与える生物学的効果は X 線と同程度とされています。CYRIC では、陽子線の治療効果を増加させることを目指し、がんへの栄養素や酸素の供給を断つ腫瘍血管遮断材(AVE8062)

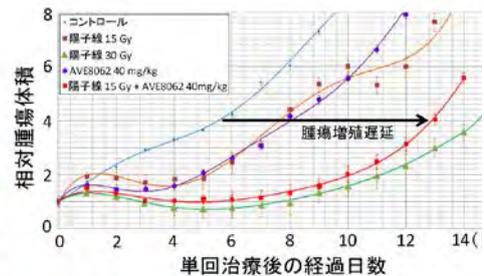
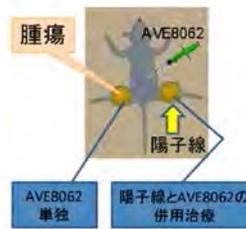


図 4. マウスの腫瘍に対する各種単回治療の腫瘍増殖曲線

と陽子線との併用治療に関する研究を行っています。NFSa 線維肉腫細胞のマウス固形がんによる基礎研究から、併用治療では各々の単独治療の場合と比べて、がんの増殖が強く抑制されることが示されました(図 4)。また、治療後の PET スキャンにより、がんの糖代謝を分析した結果、併用治療を受けたがんでは、糖代謝の低い状態が単独治療の場合よりも長く継続していることが確認されました(図 5)。

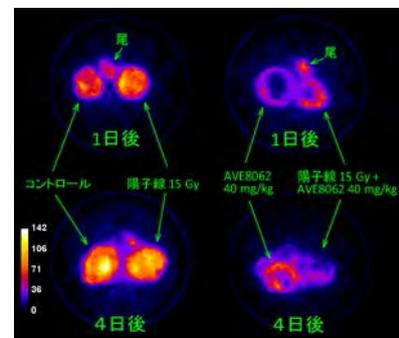


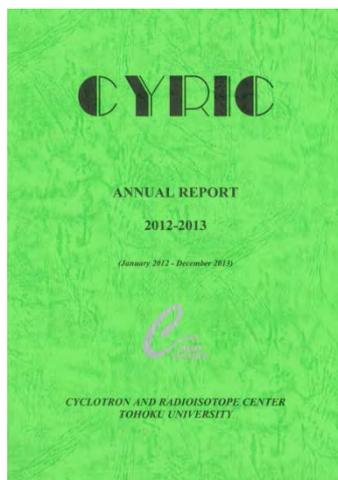
図 5. 治療後のマウス腫瘍の糖代謝

22. 広報活動

当センターでの活動を多くの方にとって頂くため、インターネット Web ページや、2年に1回発行の CYRIC Annual Report と年2回発行の CYRIC News を通して、研究内容の紹介などを行っています。



Web トップページ



CYRIC Annual Report



CYRIC News

また、当センターでは見学者を随時受け入れ、地域の放射線教育にも貢献しています。これまでも宮城県教育委員会が企画する「みやぎ県民大学」の開放講座や仙台市主催の「夏休み大学探検」などの講義・実習・見学や、県内外の中学・高校や地域グループ等の見学を通じて、原子の世界から脳の世界まで、放射線に関わる様々な応用に関する啓蒙活動に努めています。



夏休み大学探検 2008 での実習風景



PET 装置を見学中の女川町老壮大学の方々

▲ 仙台駅からのアクセス



▲ 青葉山北キャンパス



タクシー

仙台駅より10分

地下鉄

地下鉄東西線 青葉山駅
北1番出口より徒歩3分

乗用車

左記のオレンジ色のルートで入構してください。
ゲートではインターホンで警備員に用件をお伝えください。



東北大学 サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター

〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3
TEL: 022-795-7800 (代表)
FAX: 022-795-7997
<http://www.cyric.tohoku.ac.jp>

2015. 12.30 発行