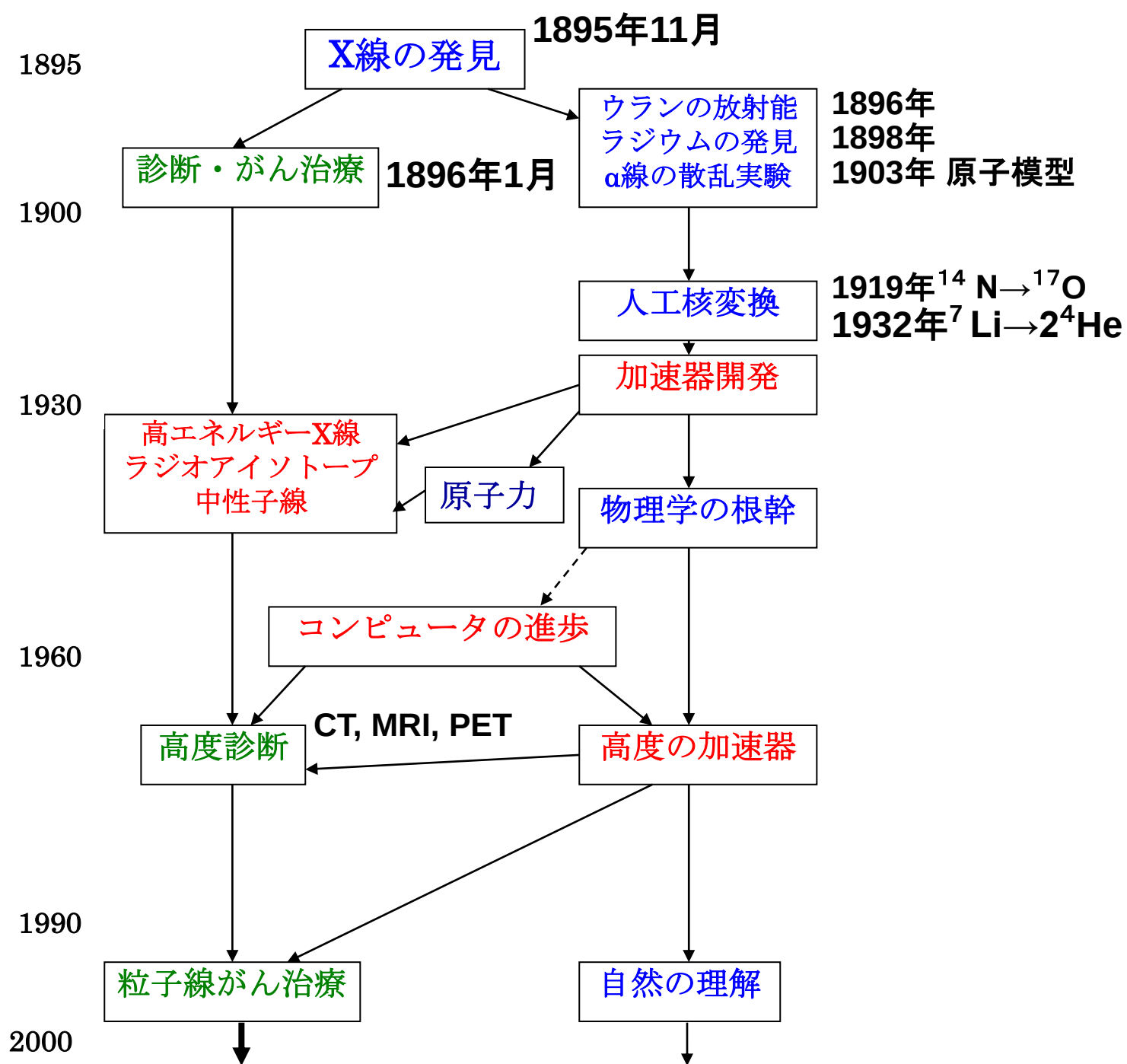


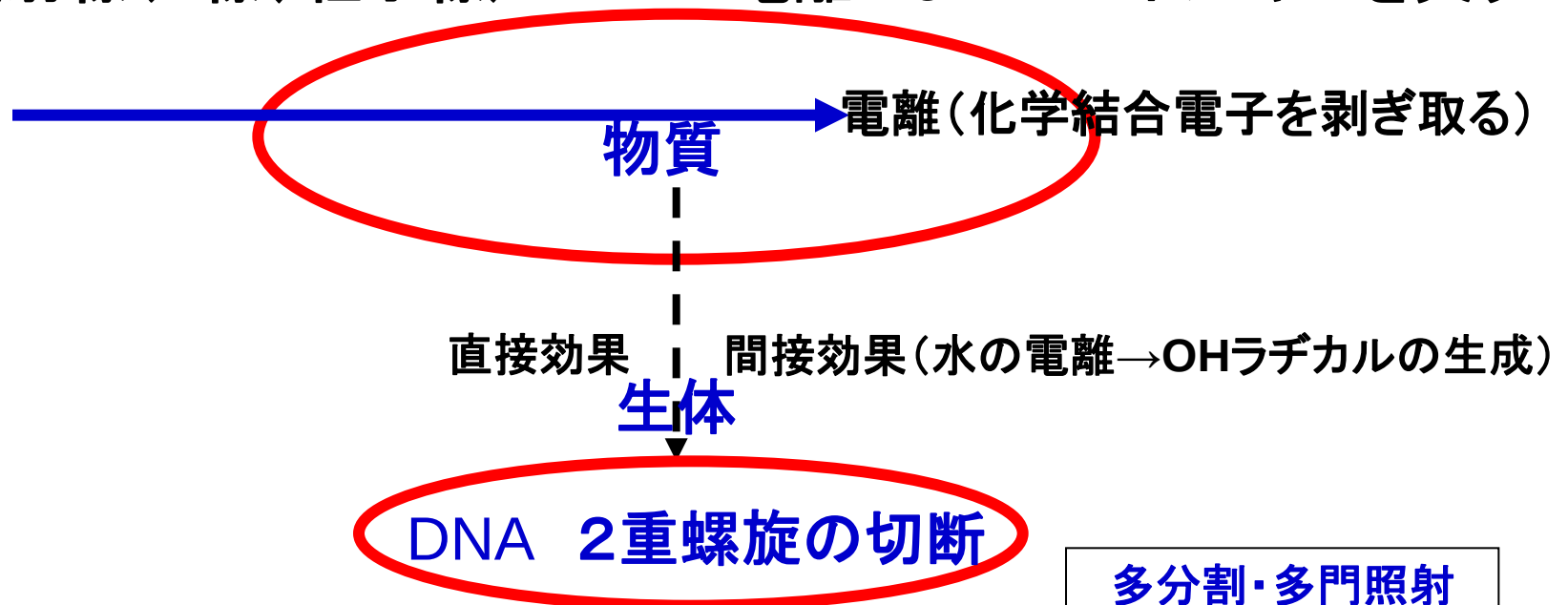
加速器開発とがん治療への応用

放射線を用いるがん治療 → 発展の歴史 → 現在 → 将来展望

平尾 泰男



放射線(X線、粒子線) — — → 電離によってエネルギーを失う



DNA一重鎖切断 $\ll 100\text{keV}/\mu\text{m}$

修復の確率大 : X線、陽子線

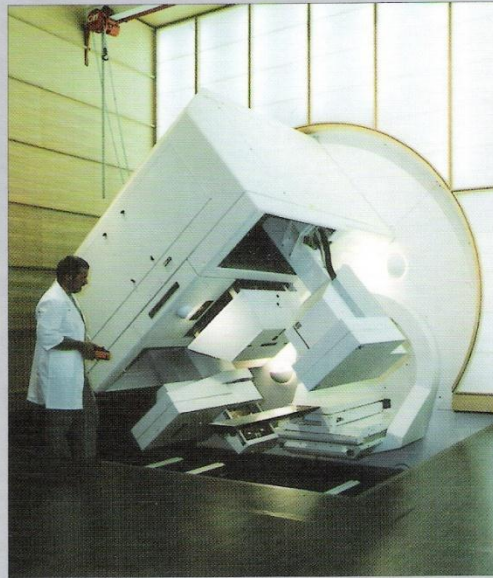
DNA二重鎖切断 $> 100\text{keV}/\mu\text{m}$

致死の確率大 : 重イオン線端末

粒子線治療の進歩

Advances in Hadrontherapy

Ugo Amaldi, Börje Larsson
and Yves Lemoigne, Editors



Excerpta Medica

International Congress Series 1144

巻頭言の要約

「・・・バークレーでの大学院時代、将来どこかの大学で静かな研究生を送ると考えていた。**ウランの核分裂の発見**がその考えを無茶苦茶にしてしまった。フェルミの原子炉開発を手伝った後、ロスアラモスの**マンハッタン計画**に参加し、ハーバード大学のサイクロトロンを盗みにいった。

・・・(中略)・・・やがて戦争も終わり、同大学の助教授になり、それを返せという立場になったが、ロスアラモスの仲間達はそれを残すことを主張して譲らなかった。結局、グローブス将軍(マンハッタン計画の責任者)は10倍の大きさのサイクロトロンの予算を付けるとの提案となった。そして古巣のバークレーで(陽子150MeV,体内飛程15cm)の**シンクロサイクロトン設計**を手伝うこととなった。

物理学者も放射線医学者もみな反対したが、私にはその仕事を続ける理由があった。どんなに正当化しようとも、過去5年間人々を殺すための仕事をして来た。**広島で原子爆弾が使われたときに**、私の心の中ではっきりとしたこと、それは今後、人を殺すのではなく、**人を救うことを考える**、それが仕事を続ける原動力だった。・・・(後略)・・・」

「高速陽子線の放射線医学応用」

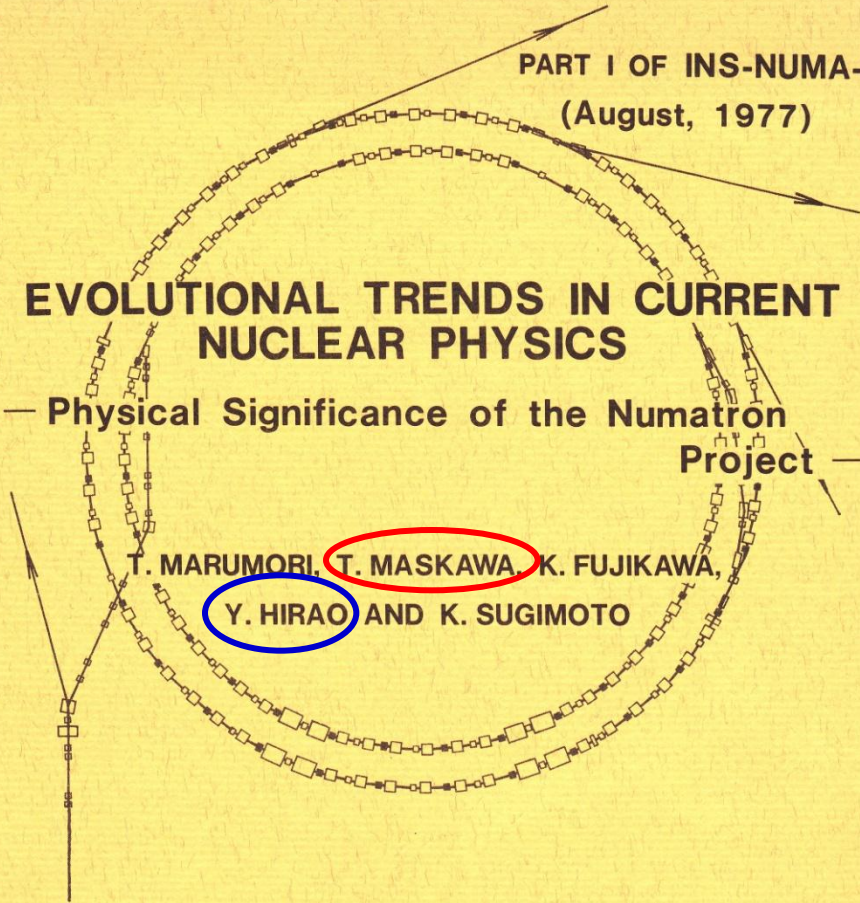
1946年 ラジオロジー誌 発表論文の要旨

最初の高エネルギーシンクロサイクロトロンが建設中である。
加速陽子のエネルギーは**体内飛程**を十分に持っている。
飛程端末よりも高エネルギーの入射領域での電離密度は少ない。
この事が体内の特定の領域を強く照射できる。

アルファ粒子が高エネルギーに加速されるならば、そのもっと高い電離密度は、生物効果を考えると、一層臨床的には望ましいだろう。そして特定の場所で、**ストラグリングと角度の広がり**は陽子の1/2である。

高エネルギー炭素原子核のような重イオン原子核が結局臨床で実用的になるであろう。

1946	R. Wilson	陽子線、重粒子線のブラッグピークのがん治療応用提唱	
1961～	MGH・Harvard	陽子線がん治療開始	9000例
1973	J. Castro	ネオン線がん治療開始	400例
1977	平尾泰男	核物理研究用高エネルギー重イオン加速器計画提案(含医療)	



PART I OF INS-NUMA-5
(August, 1977)

EVOLUTIONAL TRENDS IN CURRENT NUCLEAR PHYSICS

— Physical Significance of the Numatron
Project —

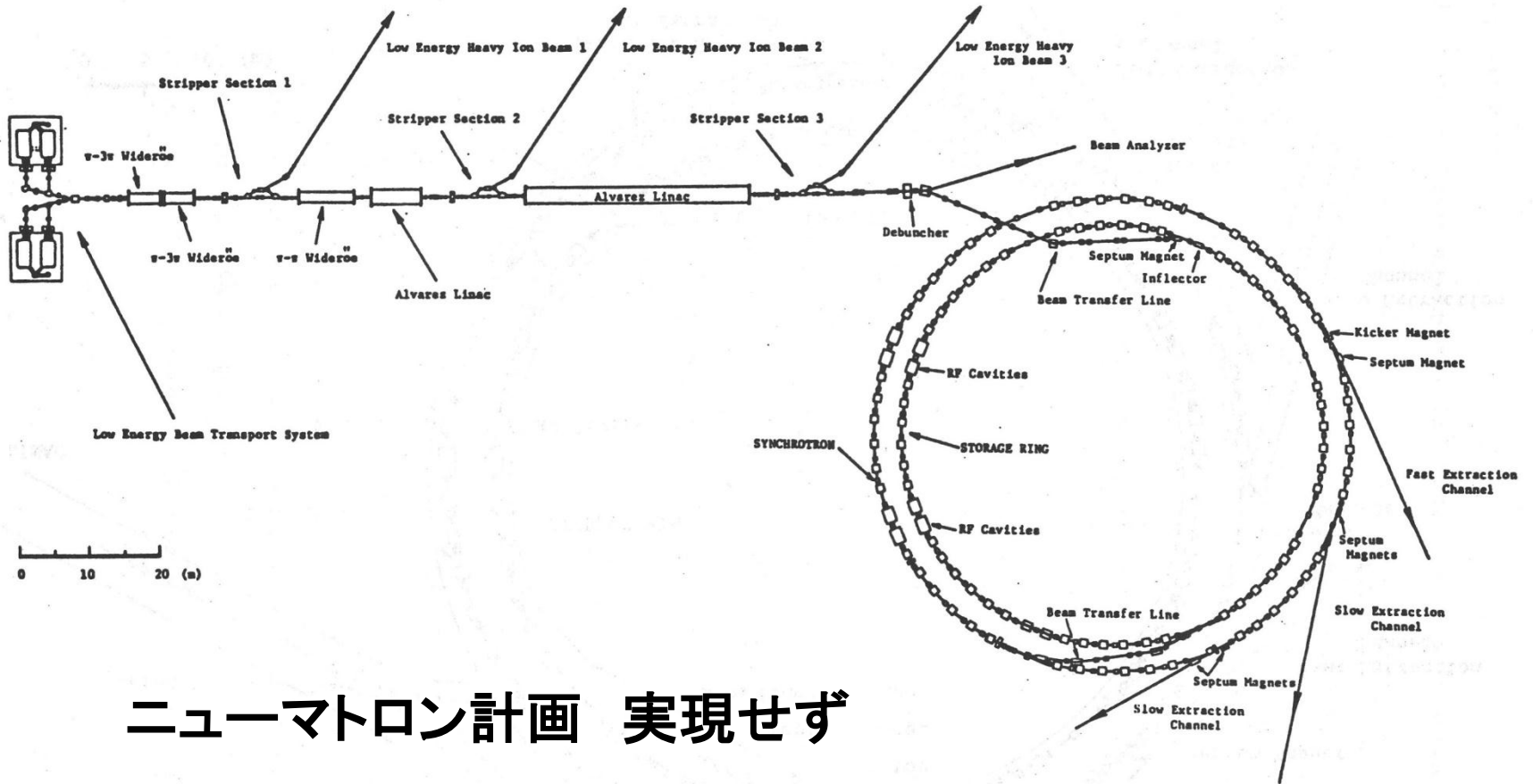
T. MARUMORI, T. MASKAWA, K. FUJIKAWA,
Y. HIRAO AND K. SUGIMOTO

February, 1978

STUDY GROUP OF NUMATRON AND
HIGH-ENERGY HEAVY-ION PHYSICS
INSTITUTE FOR NUCLEAR STUDY
UNIVERSITY OF TOKYO

*Midori-Cho 3-2-1, Tanashi-Shi,
Tokyo 188, Japan*

LAYOUT OF NUMATRON



ニューマトロン計画 実現せず



ハイマック計画 1994年完成

1977年当時、**強集束型・重イオンシンクロtron**は、
世界的に実現していなかったのもので、

わが国の加速器物理学者たちは**実現困難**とした。

東大原子核研究所では、各種のR&Dが実行された。

重イオン源、RFQライナック、重イオン蓄積リング・強集束シンクロtronへの多重入射・高周波蓄積、確率冷却、電子ビーム冷却、超高真空、広帯域高周波加速空洞、等々。

やがて、その実現性は**世界的に確信**されるにいたり、

GSI(ドイツ)では基礎科学研究用**強集束型・重イオンシンクロtron・重イオン蓄積リング**の建設を開始した。

Dr. Eickhoff 当時の留学生、現在GSI副所長

1946	R. Wilson	陽子線、重粒子線のブラッグピークのがん治療応用提唱	
1961～	MGH・Harvard	陽子線がん治療開始	9000例
1973	J. Castro	ネオン線がん治療開始	400例
1977	平尾泰男	核物理研究用高エネルギー重イオン加速器計画提案(含医療)	
1979	平尾泰男	がん治療専用重イオン加速器計画提案 (含基礎研究)	
1981	梅垣洋一郎	せめて陽子線からでも開始するよう要請 → KEK	
1983～	筑波大学	陽子線がん治療開始(2001～専用施設に移行)	700例(1300)
	中曽根内閣	対がん10ヵ年総合戦略・新治療法の開発	
1987～	放医研	重粒子線がん治療装置建設開始	

重粒子線がん治療装置

1993,11 完成

HIMAC

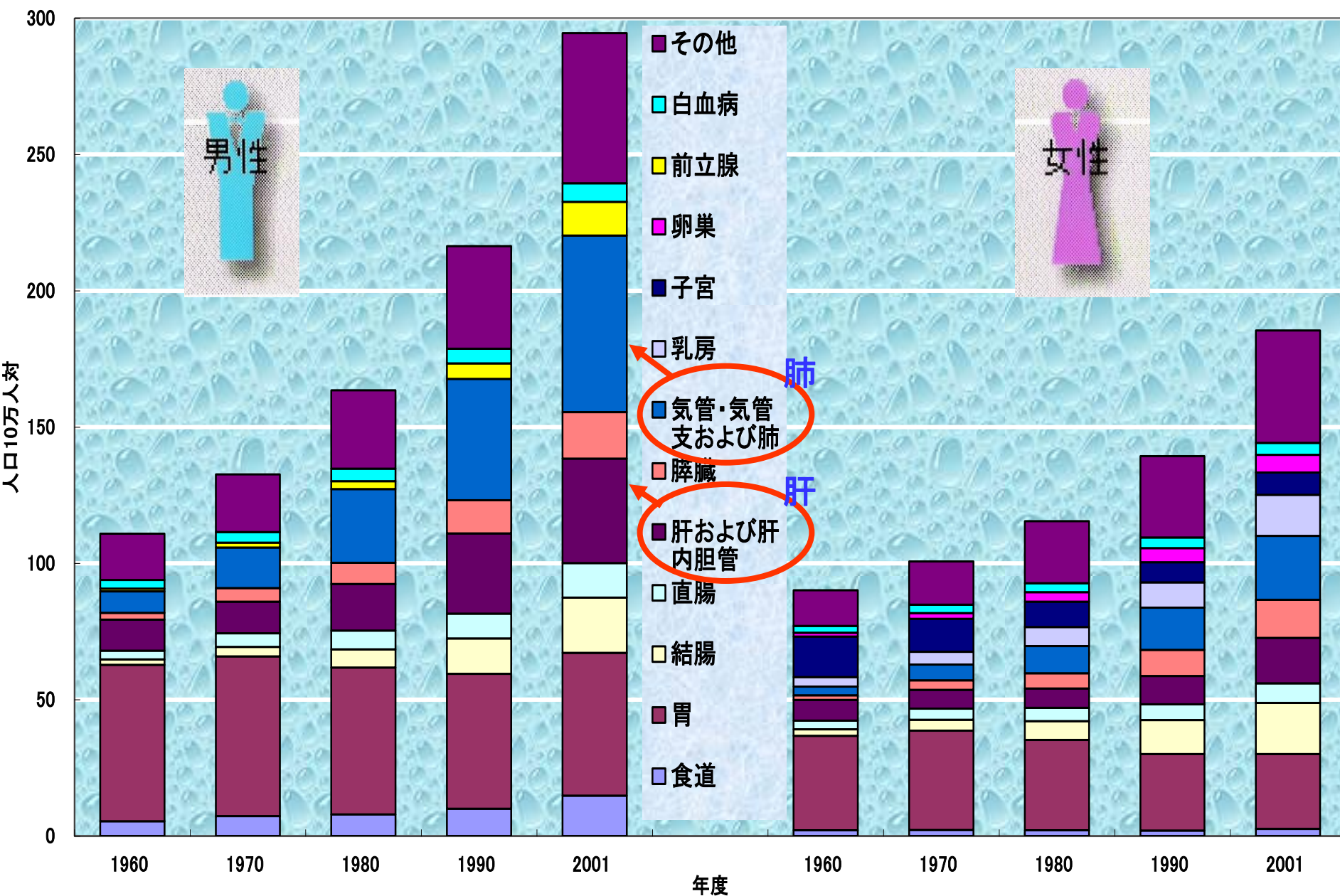


陽子～アルゴン

体内飛程 30cm

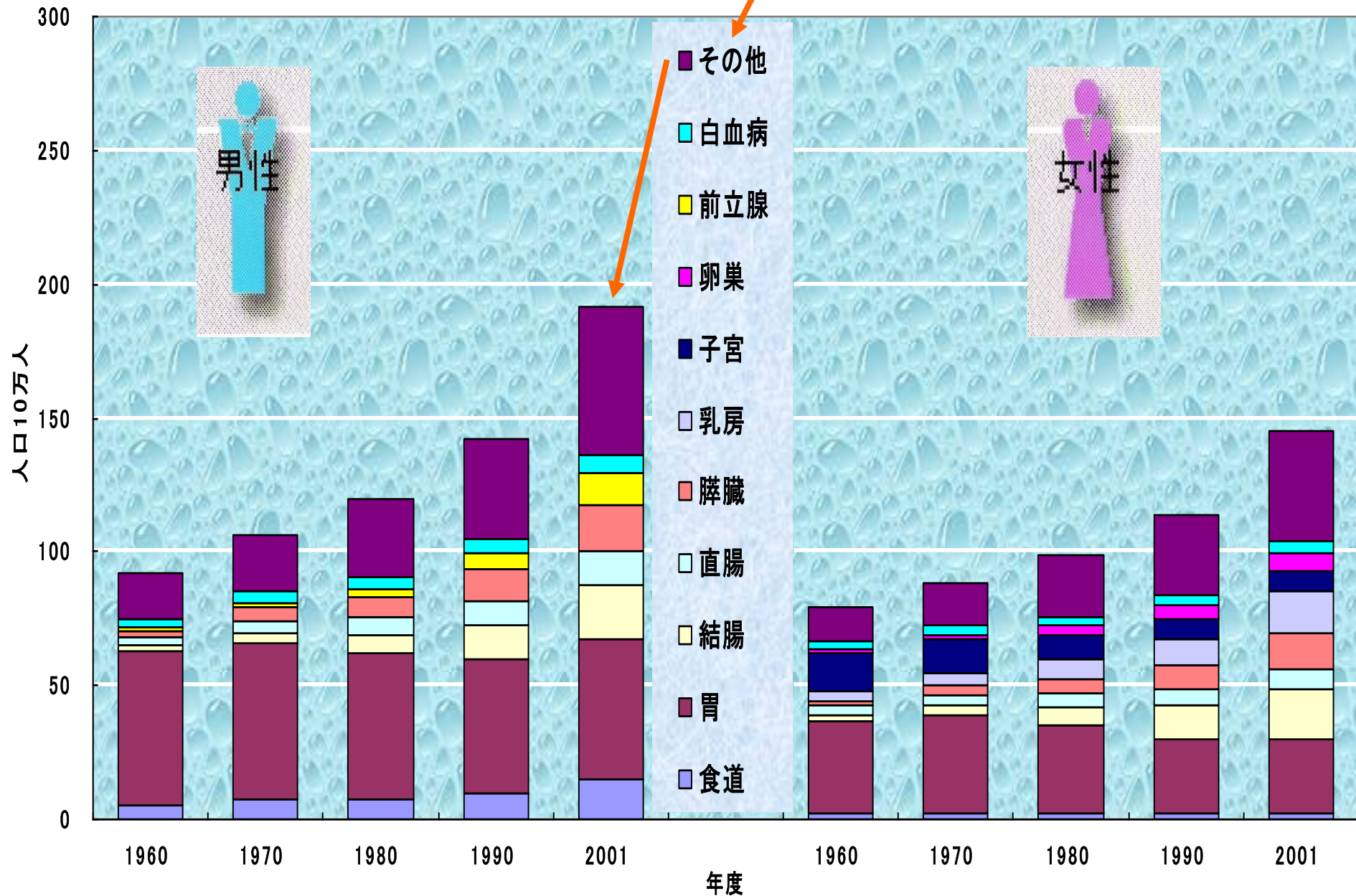
1946	R. Wilson	陽子線、重粒子線のブラッグピークのがん治療応用提唱	
1961～	MGH・Harvard	陽子線がん治療開始	9000例
1973	J. Castro	ネオン線がん治療開始	400例
1977	平尾泰男	核物理研究用高エネルギー重イオン加速器計画提案(含医療)	
1979	平尾泰男	がん治療専用重イオン加速器計画提案 (含基礎研究)	
1981	梅垣洋一郎	せめて陽子線からでも開始するよう要請→KEK	
1983～	筑波大学	陽子線がん治療開始 (2001～専用施設に移行)	700例(1300)
	中曽根内閣	対がん10ヵ年総合戦略・新治療法の開発	
1987～	放医研	重粒子線がん治療装置建設開始	
1994～	放医研	<u>炭素線がん治療開始 (16年経過)</u>	<u>>5000例</u>
1997～	GSI	炭素線頭頸部がん治療開始	300例
2000～	国立がんセンター東病院	陽子線がん治療開始	500例
2002～	兵庫県粒子線治療センター	陽子線がん治療開始	1400例
2003, 11	放医研	<u>炭素線がん治療・高度先進医療承認</u>	
2003～	静岡県がんセンター	陽子線がん治療開始	300例
2005～	兵庫県粒子線治療センター	炭素線がん治療開始	140例

部位別がん死亡率の推移



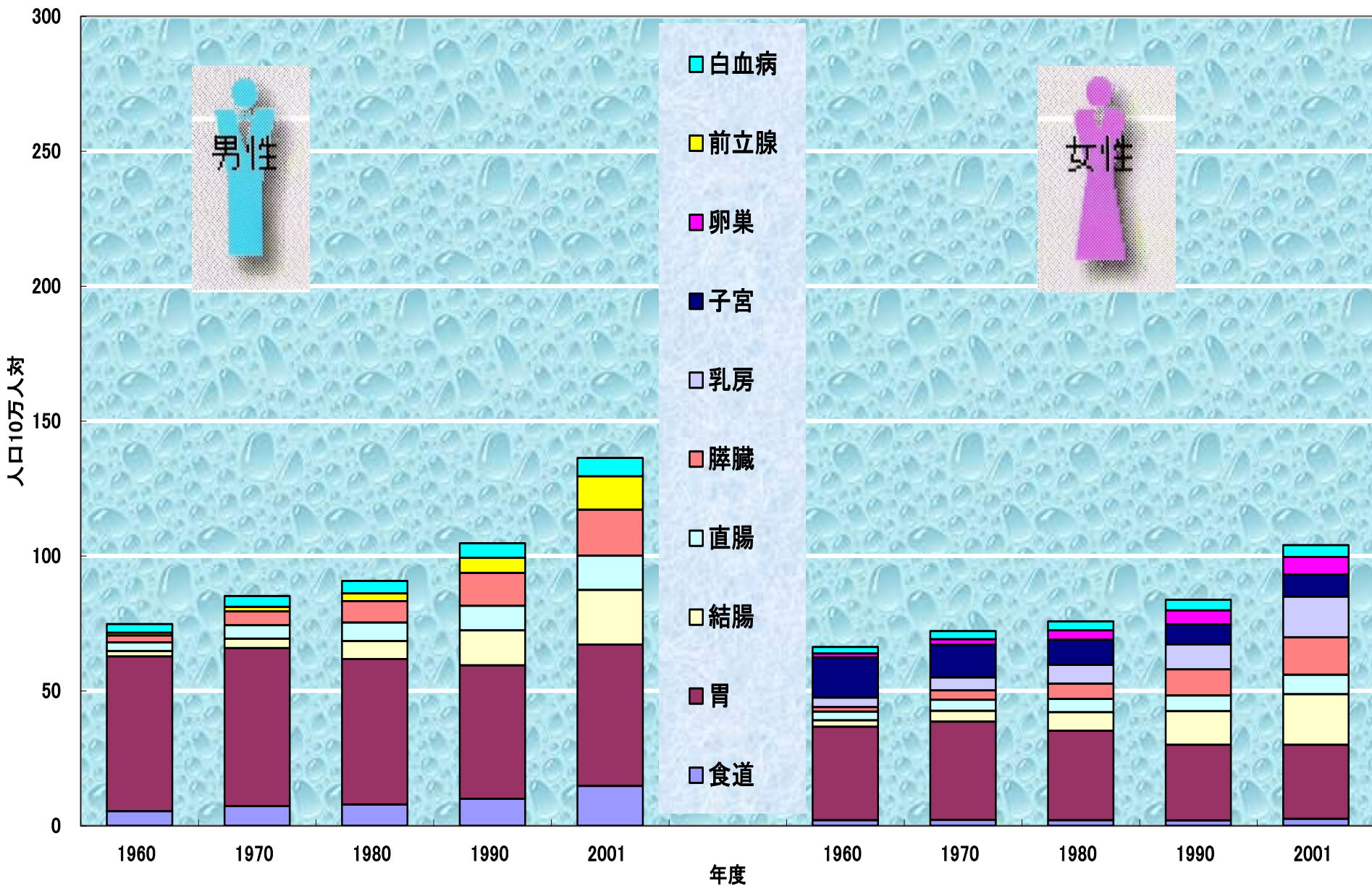
部位別がん死亡率の推移

肺・肝を除く (脳、頭蓋底、頭頸部、舌、骨・軟部、等々)



部位別がん死亡率の推移

肺、肝、その他を除く



(3人に1人ががんで死亡)

日本人は、**年間30万人**ががんで死亡 !!

近年のがん死亡者の急増の主たる要因である**肺がん、肝がん等**
が短期間の治療で根治できるなら ??

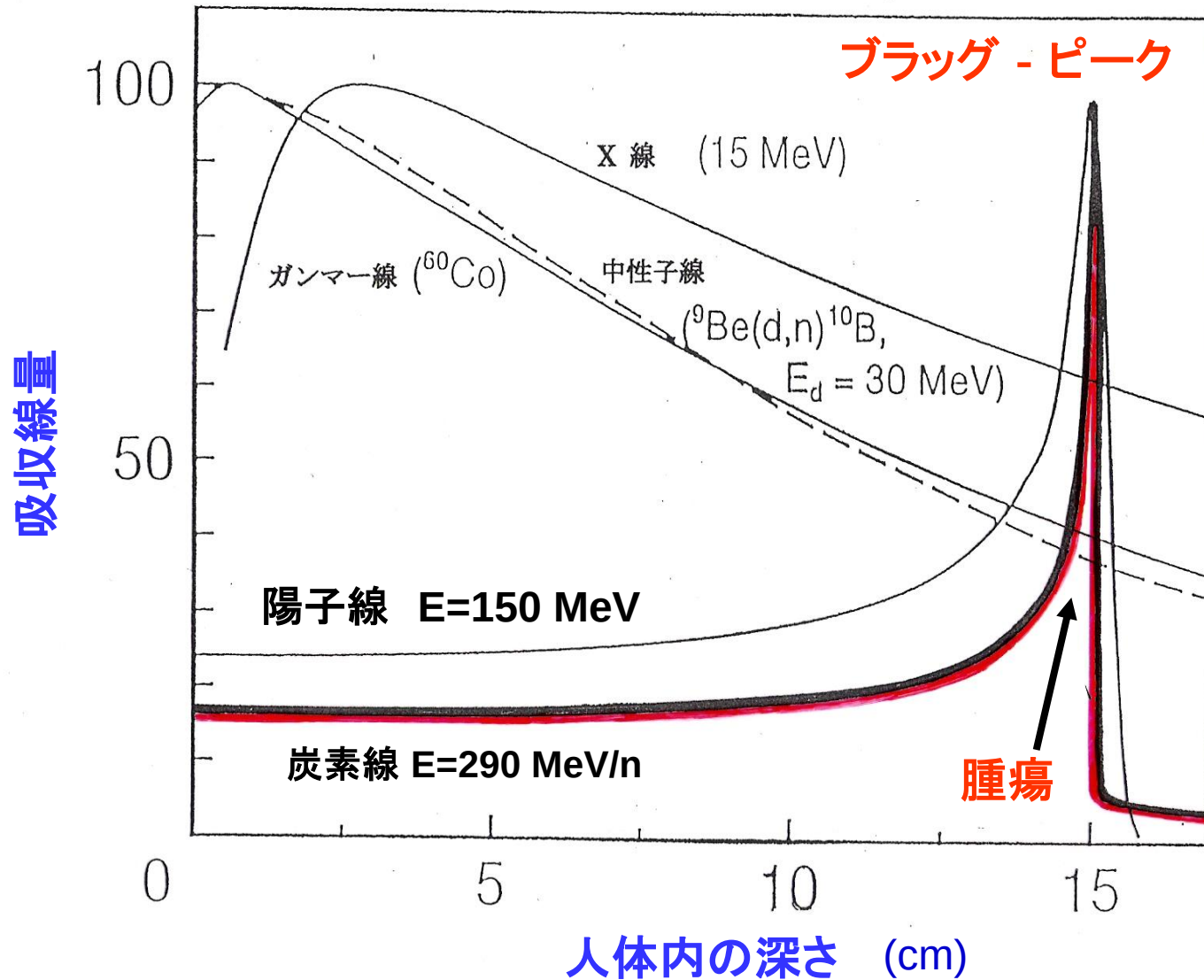
治療法のない難治がん(**切除困難な骨肉腫、悪性黒色腫、等々**)
が根治できるなら ??

患者にとっても、社会にとっても、そのメリットは計り知れない !!

これらが可能であることを実証したのが、

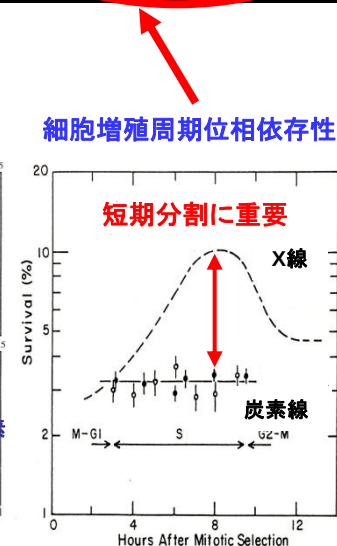
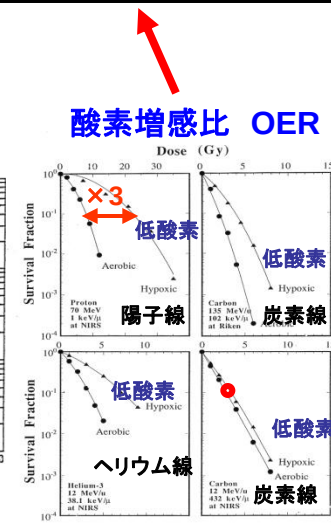
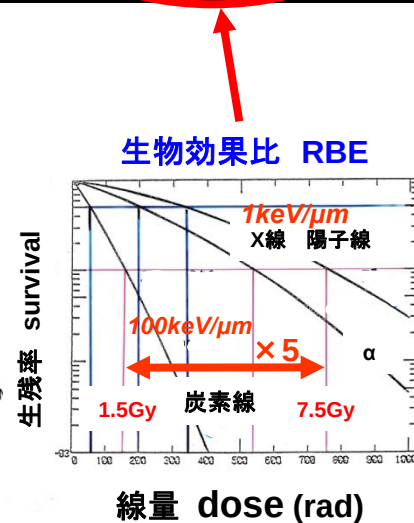
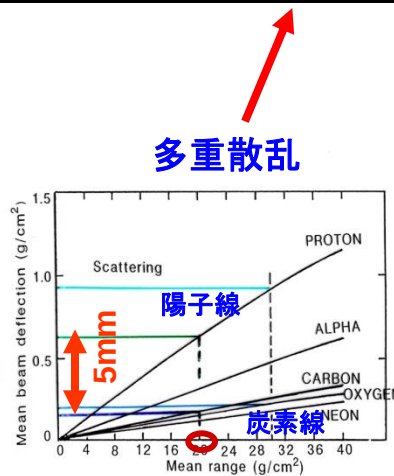
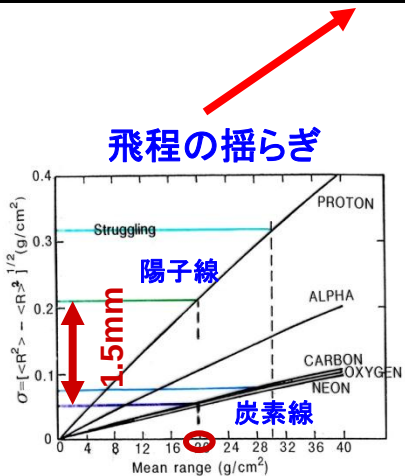
放射線医学総合研究所の**炭素線がん治療** !!

各種放射線の吸収線量の深さ分布



各種放射線の効果比較

	ブラッグピーク精度 (飛程20cm)	散乱精度 (飛程20cm)	生物効果	低酸素感受性	増殖周期位相感受性
X線	—	—	1	~1/3	~1/3 (DNA合成・後期)
陽子線	2mm	6mm	~1	~1/3	~1/3 (DNA合成・後期)
炭素線	0.5mm	1mm	~×3 (標的内) ~1 (途中経路)	~1 (標的内)	~1 (標的内・全位相)



炭素線治療の総線量(GyE)・分割照射回数

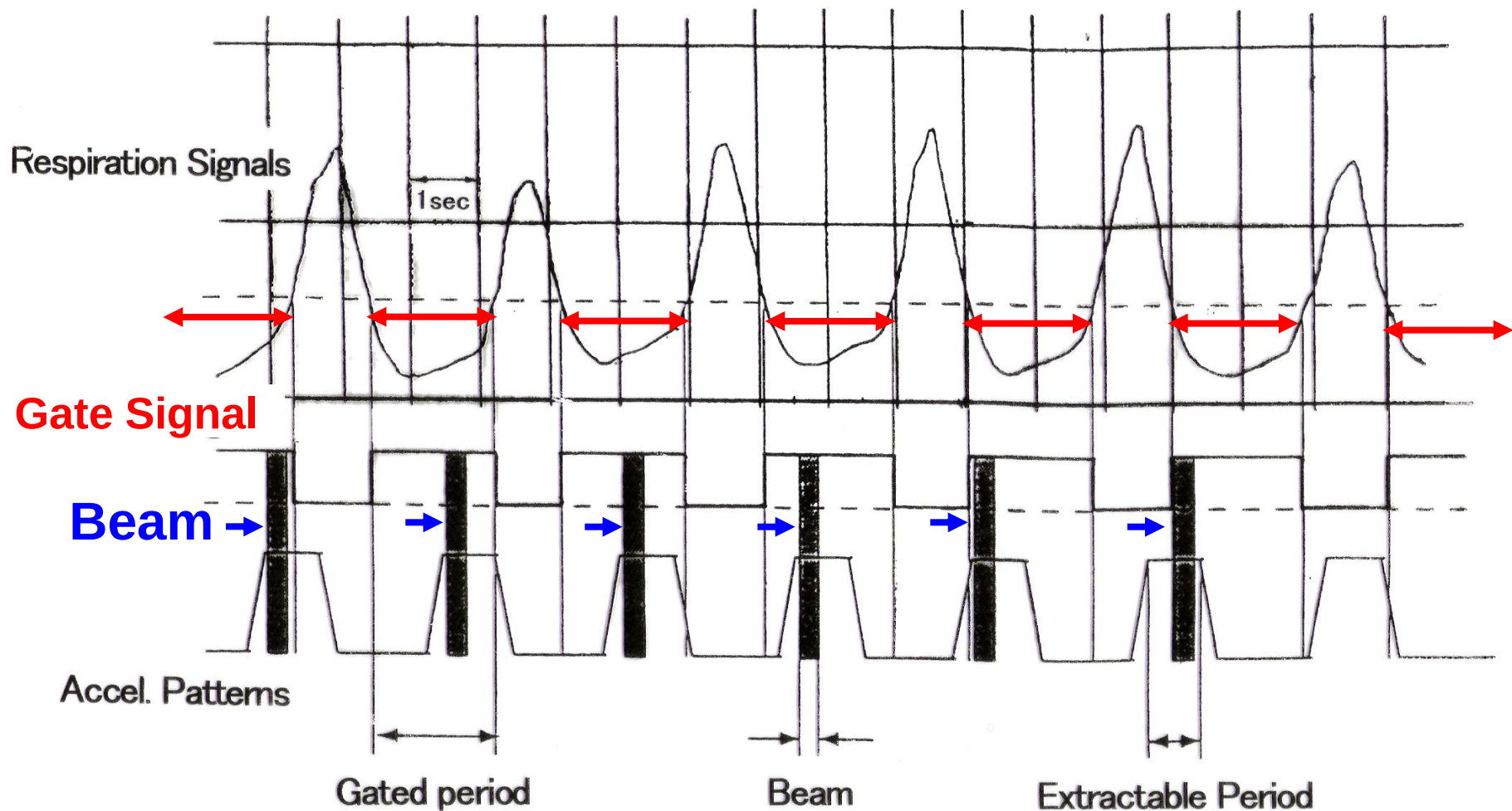
部位	総線量	分割回数
前立腺	66	20→ 16 →12
頭頸部	58	16
骨・軟部	70	16
肝	53→36	4→2→1
肺	52→28→42	4→1

E~3

X-線、陽子線は 60 Gy / 30~40回が標準的治療

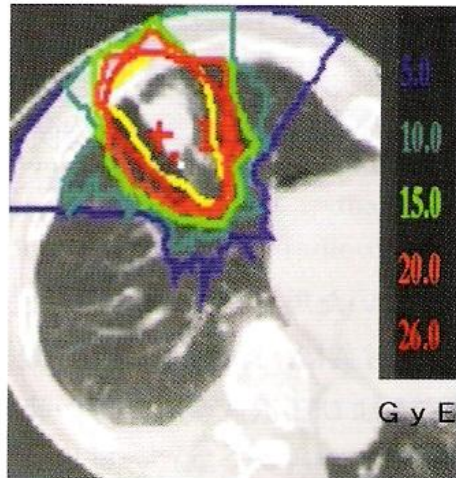
呼吸同期照射法

Gated Irradiation with Respiration at HIMAC

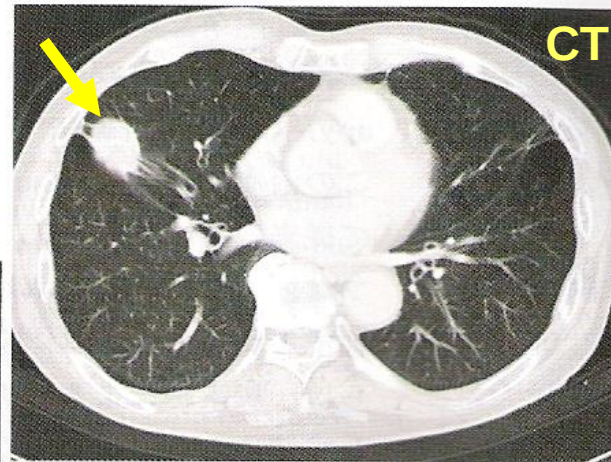


肺・腺癌の1回4門照射 28GyE/1fr

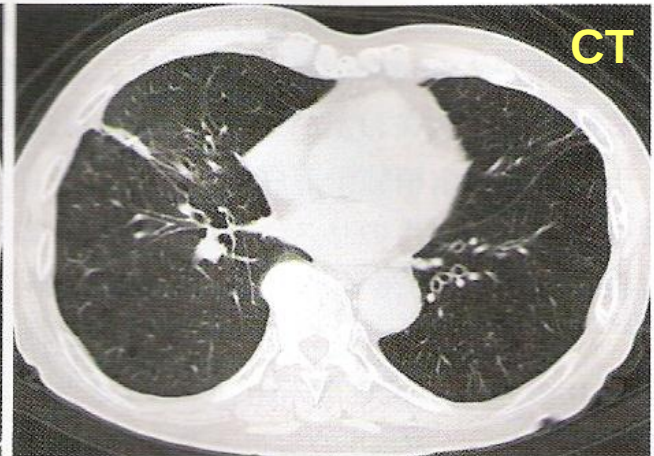
日帰り1日！



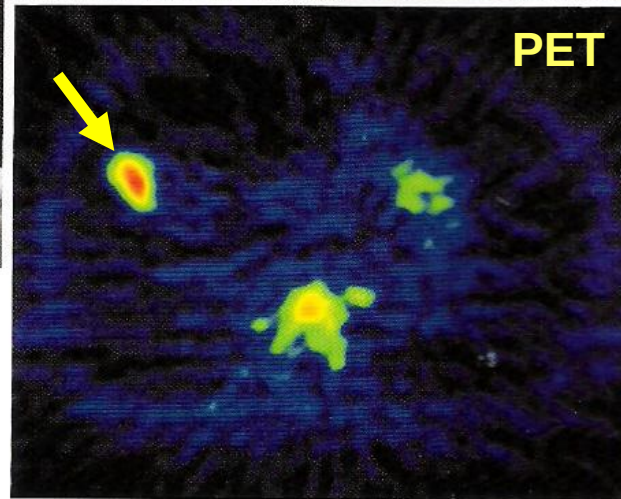
Dose distribution



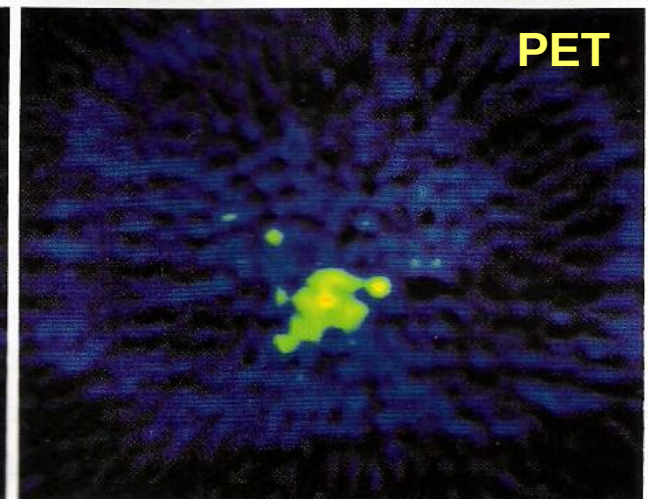
CT



CT



PET



PET

Before treatment

After treatment

Carbon beams dose distribution, tumor and response on CT and PET images for a case. The primary lesion of the patient with histological proven adenocarcinoma (T2) was treated with a single of carbon beam dose at 28 GyE from 4 directions (4 portals). **Left** : Dose distribution map of carbon beams. **Right** : the tumor on CT and PET before and at 6 months after therapy.

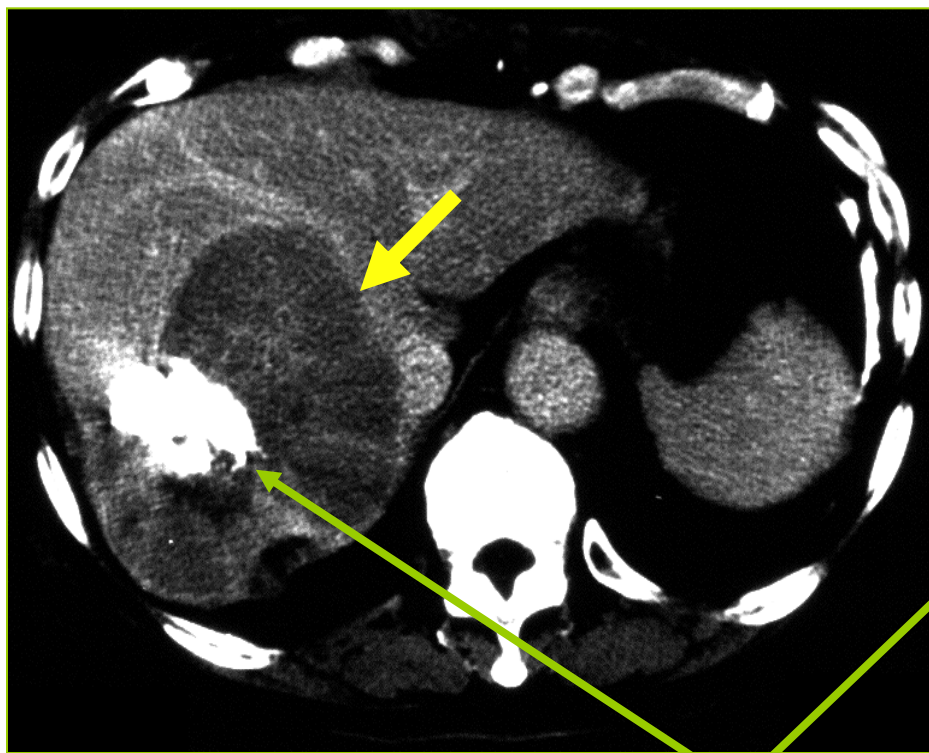
肝細胞がん 71才, 男性, S7, **11.2**cm, 6.5年生存

52.8GyE

4frs.

治療前

1 年後



肝動脈塞栓治療の痕跡

(リピオドール注入)

上行結腸癌、肝転移右葉切除後、再々発

67才 男性 1.8cm S4

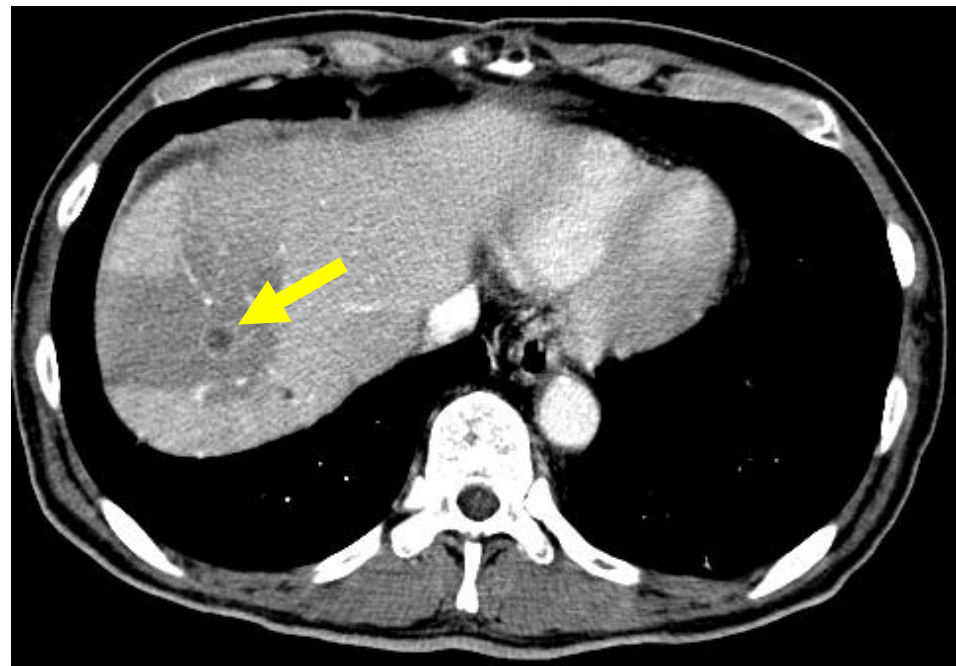
36.0GyE

1 frs.

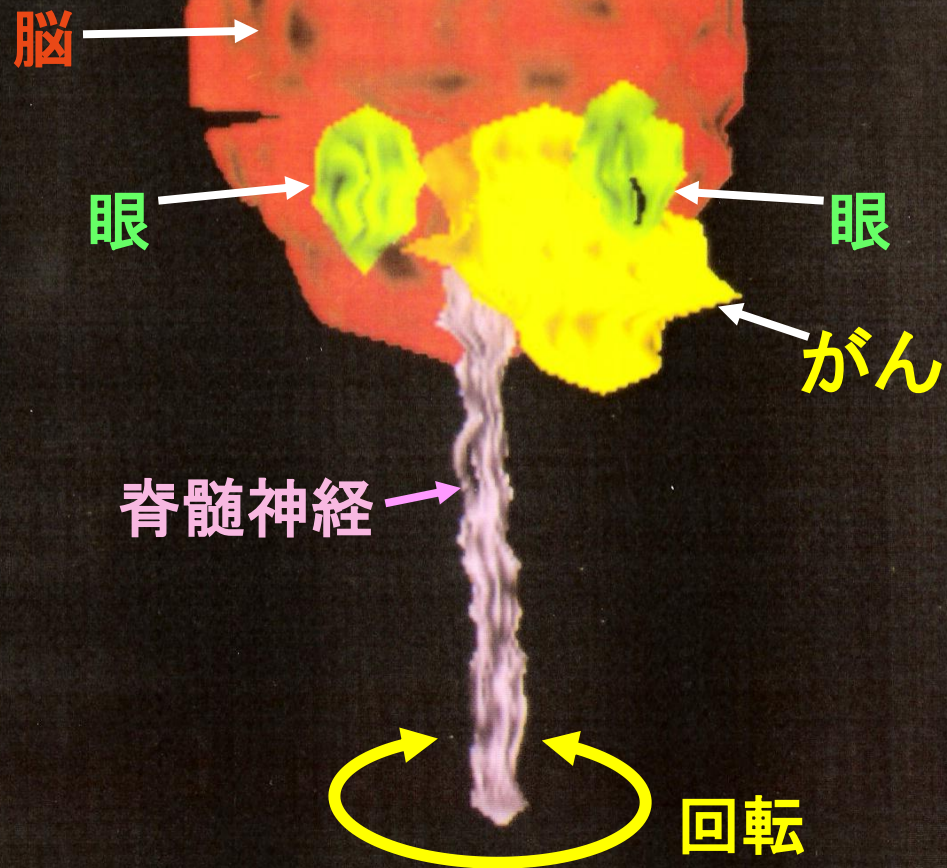
日帰り1日！

治療前

1月後



照射方向決定用 3D コンピュータグラフィック

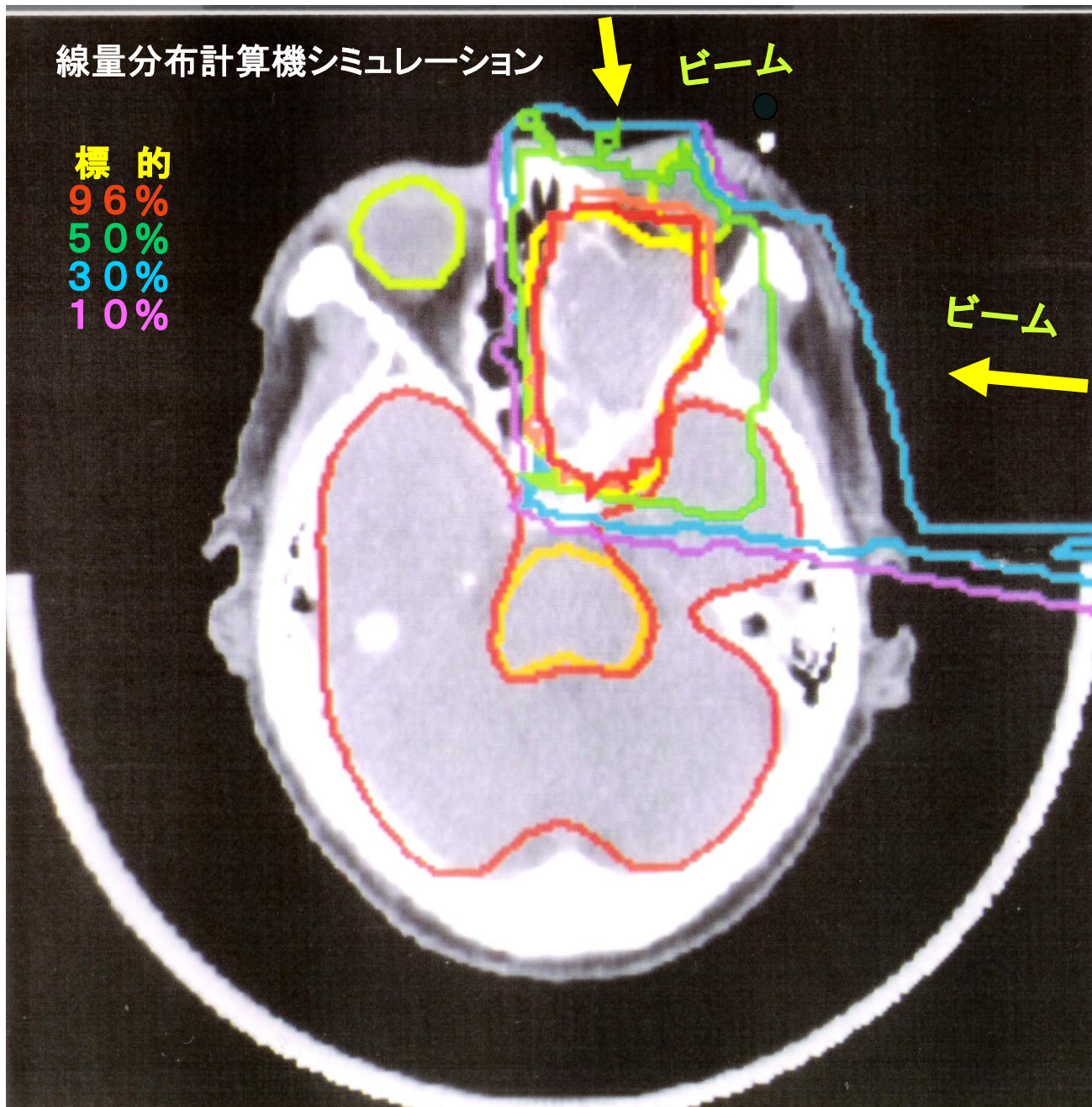


線量分布計算機シミュレーション

ビーム

標 的
96%
50%
30%
10%

ビーム



最近の臨床パイロットスタディー

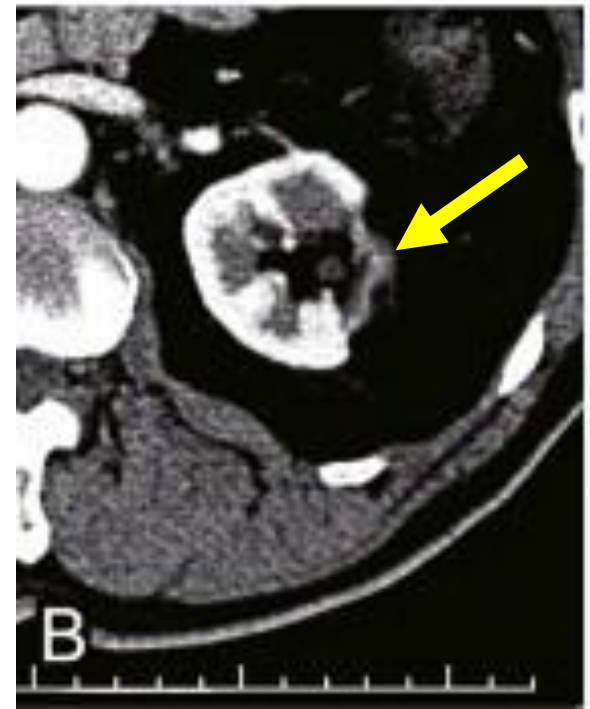
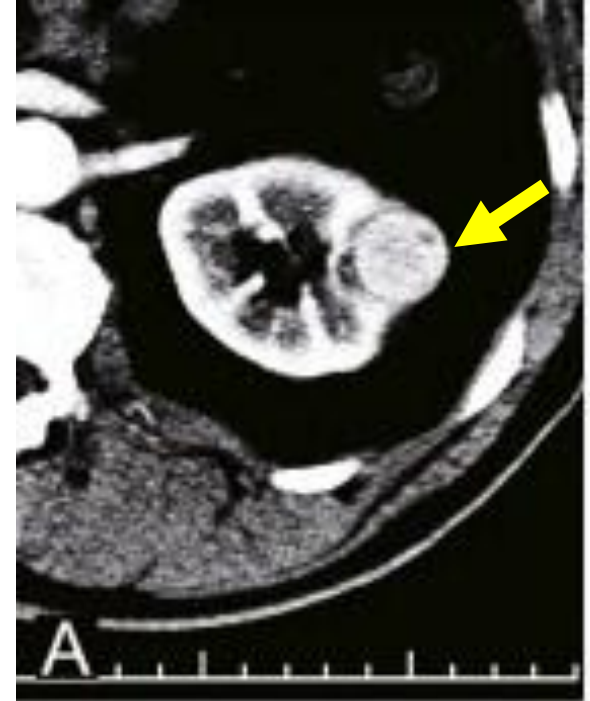
腎がんの炭素線治療のCT画像

Carbon Ion Therapy for Renal Cell Carcinoma

A: 治療前 before Treatment
72GyE/16fr

B: 5年後、腫瘍は消失

5 years after, this tumor has disappeared



炭素線は

遠隔
精密
鋭利
無痛
無菌
反復使用
電子情報

の新しいメス！

炭素線がん治療の推移

1983年、中曽根総理が閣議決定

対がん10ヵ年総合戦略→新治療法の確立→

重粒子線がん治療装置開発(放射線医学総合研究所)

炭素線による臨床試験:有効な治療法のない症例を対象
現在、>5000症例で有効性の高さと副作用の低さを実証

放射線医学総合研究所の実績等を基礎として

ヨーロッパ各国(ドイツ、イタリア、オーストリア、フランス、等)では
一国一施設の建設計画、アメリカでも検討開始

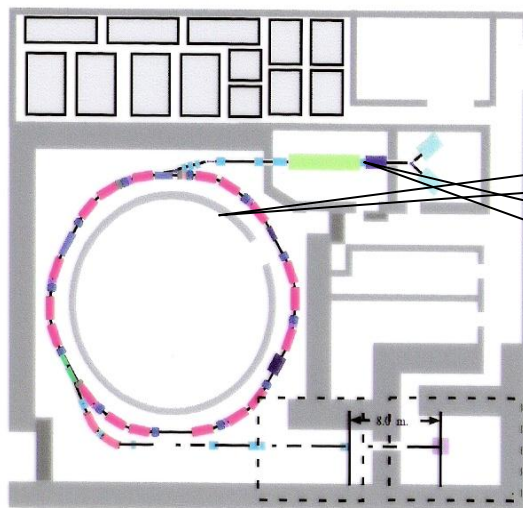
トップの走り方

わが国は、15年以上のリード！！！！

いまや普及、全国展開の時期に！！！！

そして海外へ！

普及型炭素線 治療施設

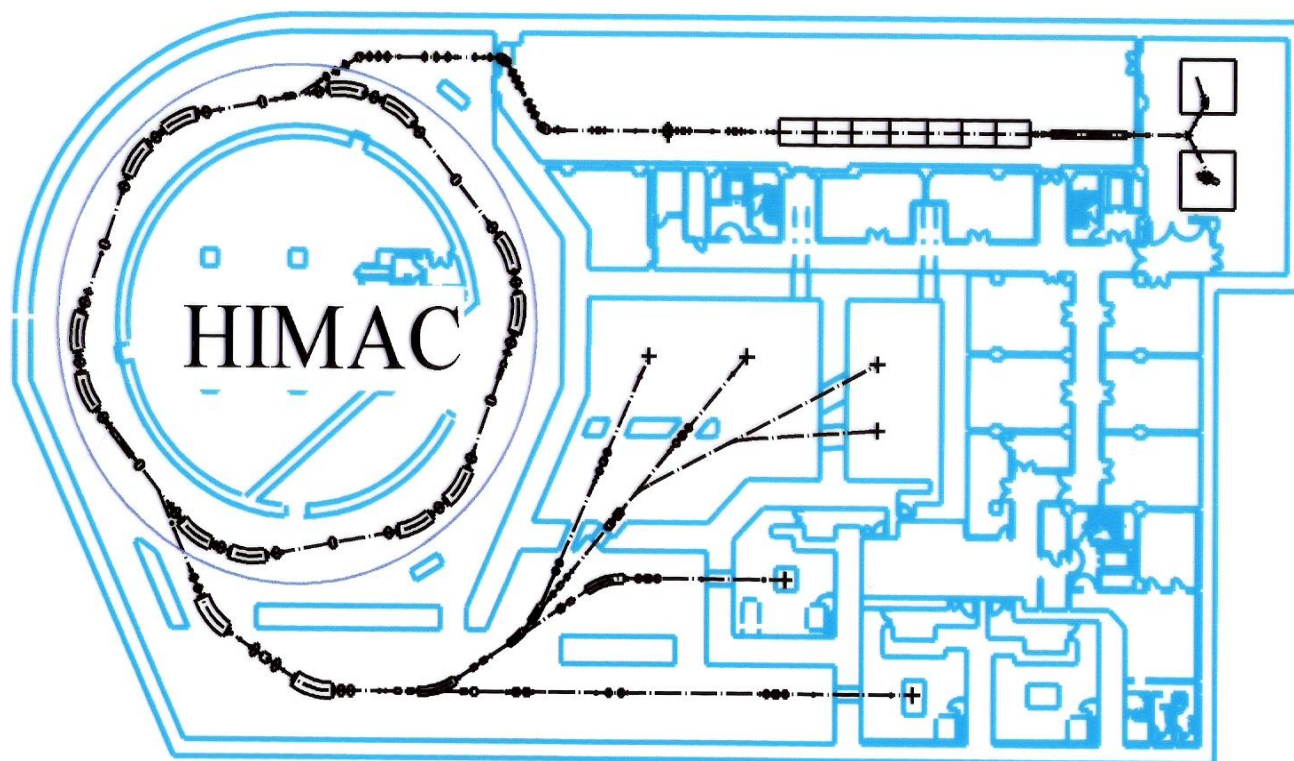


~ × 1/3 HIMAC

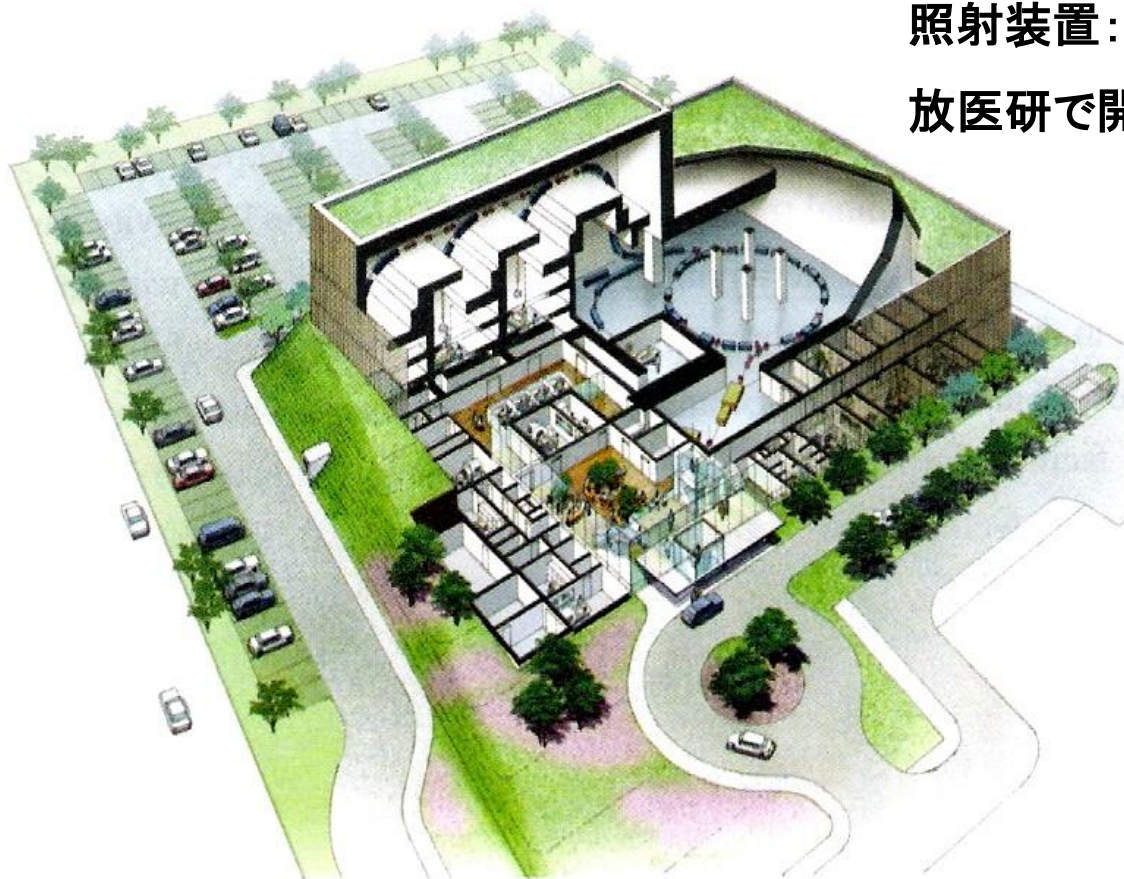
炭素線 & 飛程20cm に**限定**

新イオン源 & **新**線型入射器

20 m



普及器 第1号:群馬大学、完成:2010,3、臨床試験開始

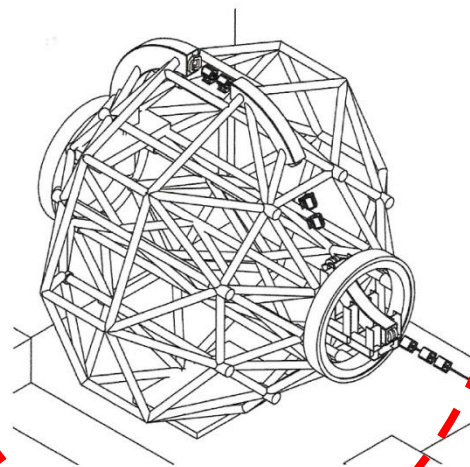


照射装置:HIMACと同様

放医研で開発中:~~スパイラルワブラー法、~~

~~ラスタースキャンニング法~~

~~回転ガントリー~~



粒子線治療法

高度画像診断に基づく線量集中性に依拠した治療



相補性

硼素中性子捕捉治療(BNCT)

薬剤の腫瘍細胞集積性に依拠した治療



車の両輪



陽電子放出核断層画像診断法(PET)

核磁気共鳴画像診断法(MRI)

X線—CT

原子・原子核・加速器物理学の医療への応用