

粒子加速器技術のトータルシステム展開と 日立製作所の取組み

Development of Total System Technology of Particle Accelerator

尾崎 典彦*

Norihiko Ozaki

花村 修三**

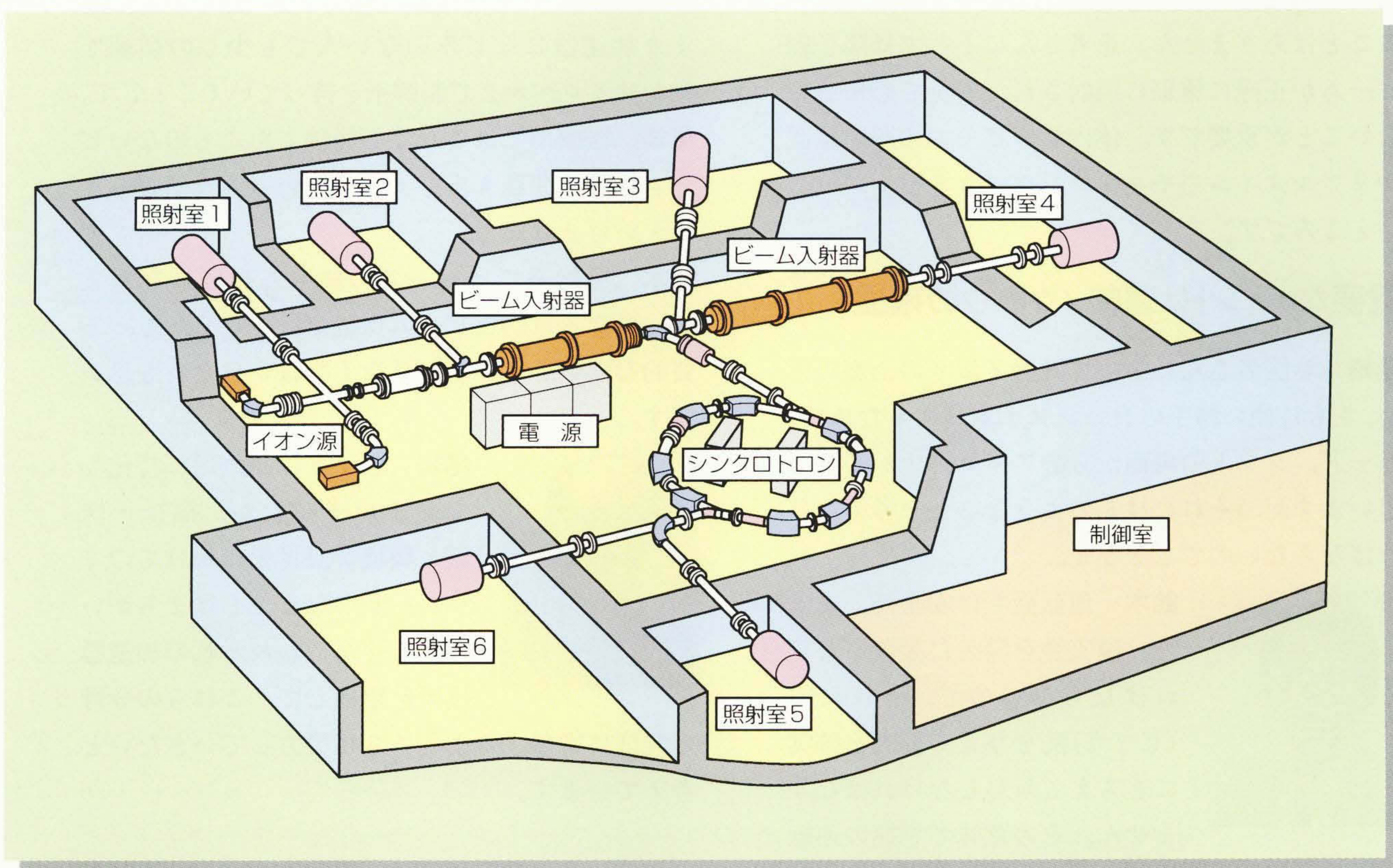
Shûzô Hanamura

長戸路雄厚*

Yûkô Nagatoro

安富 健***

Takeshi Yasutomi



粒子線加速器システムのイメージ

この加速器システムは、イオン源とビーム入射器、そしてシンクロトロンで構成する。イオンビーム多目的利用システムのイメージを図に示す。各種のエネルギーのイオンビームを、物質科学、生命科学、そしてがん治療などの先端医療に利用することができる。

最近の粒子加速器技術の進歩は著しく、利用分野も拡大の一途をたどっている。粒子加速器は、原子核物理学や高エネルギー物理学(素粒子物理学)の研究だけでなく、物質科学、生命科学、医学そして産業などの先端技術開発に広範囲で使われている。粒子線の種類は電子、陽電子、光子、陽子、中性子、イオンビームそしてRI (Radioisotope) ビームなどと多数に及んでいる。

これまでの加速器ビジネスは、電磁石や電源などのシステムコンポーネントの納入が中心であった。しかし最

近のビジネス環境は、トータルシステムを受注する方向へと変貌(ぼう)している。この流れは、21世紀先端医療の一つとして着目されている陽子や重イオンによる粒子線がん治療の分野で顕著である。

加速器設備は、社会的基盤の一つになりうる。これからは、顧客の計画策定段階からのプリエンジニアリングや、各種サポートを視野に入れたシステム全体の構築を基幹とするビジネスが必須となる。

*日立製作所 核融合加速器推進本部 工学博士 **日立製作所 電機システム統括営業本部 ***日立製作所 電力統括営業本部

1. はじめに

これまでは、加速器と言えば原子核物理学や高エネルギー物理学の研究用大規模実験装置との認識が専らであった。しかし、加速器で生成される高エネルギーの電子ビームやシンクロトン放射光(X線領域光子)、さらにはイオンビーム等の分子生物学、医学、産業などへの適応性が認められるにしたがって、利用の裾(すそ)野は急速に広がった¹⁾。最近では、がん治療への積極活用の気運が大きく高まっている。

加速器の利用範囲と顧客は多岐にわたり、システム構成は多種多様である。加速器本体システム構成を図1に、関連する業務構成を図2にそれぞれ示す。顧客のメーカーへの技術要求レベルは高度化し、厳しい低コスト化が要請されている。

ここでは、加速器の利用分野、市場動向、加速器技術の現状課題を俯瞰(ふかん)し、さらに、日立製作所が傾注している「トータルシステム展開」について述べる。

2. 利用分野

加速器利用分野とその内容を表1に示す。

2.1 原子核物理学および高エネルギー物理学

加速器と原子核物理学との関連は、20世紀初頭以来と古く、核反応や核構造の研究が行われてきた。高エネルギー物理学は、クォークなど各種の基本的素粒子や素粒子間に働く相互作用の検証に加速器を使用している。

今後は、高エネルギー物理学と原子核物理学を統一的に把握する研究が展開され、その一環として各種RIビームを用いる不安定原子核研究用加速器も注目されると考える。

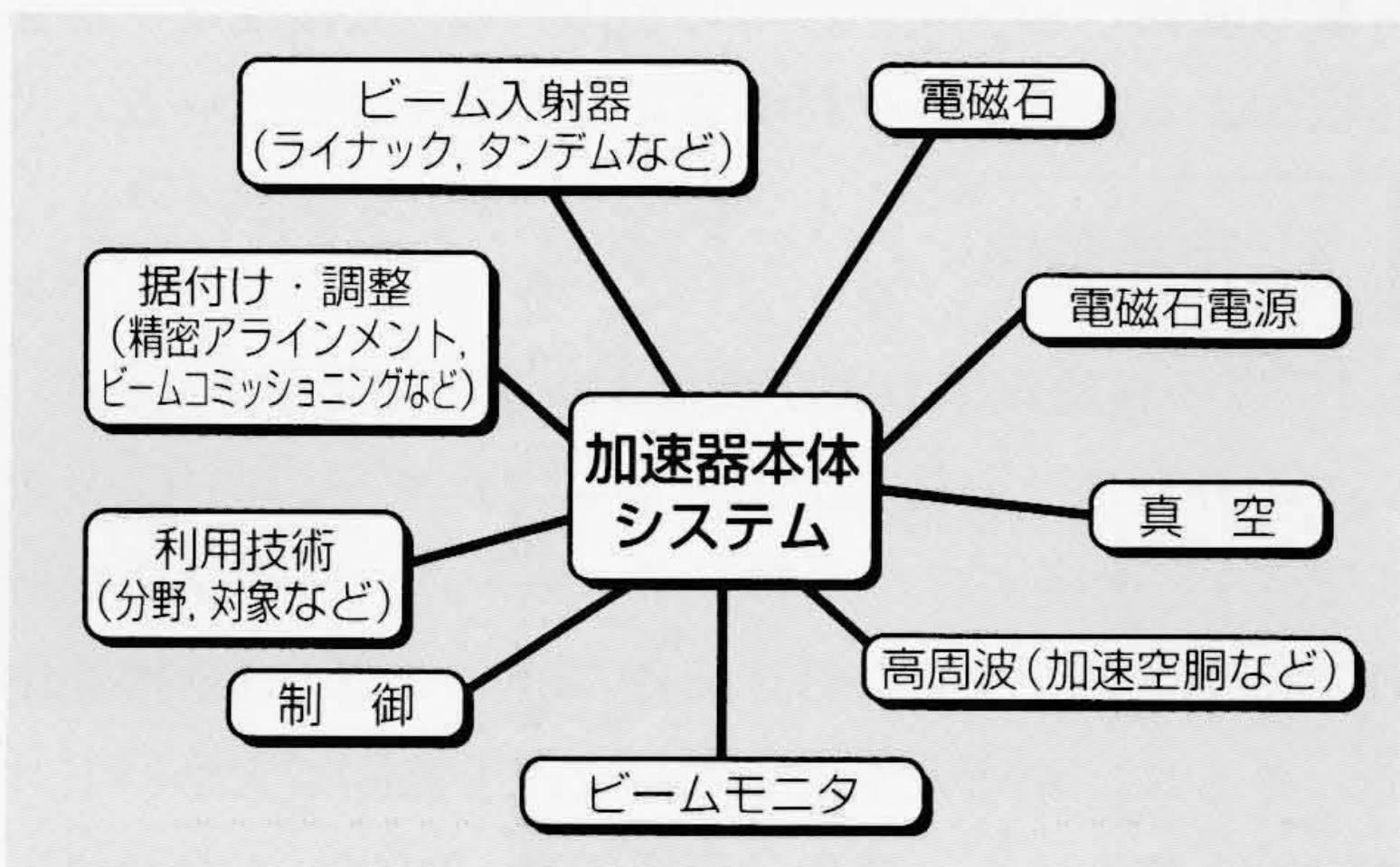


図1 加速器本体システムの構成

加速器本体は、多数の基礎技術とそれらの調和によって成立する複合システムである。

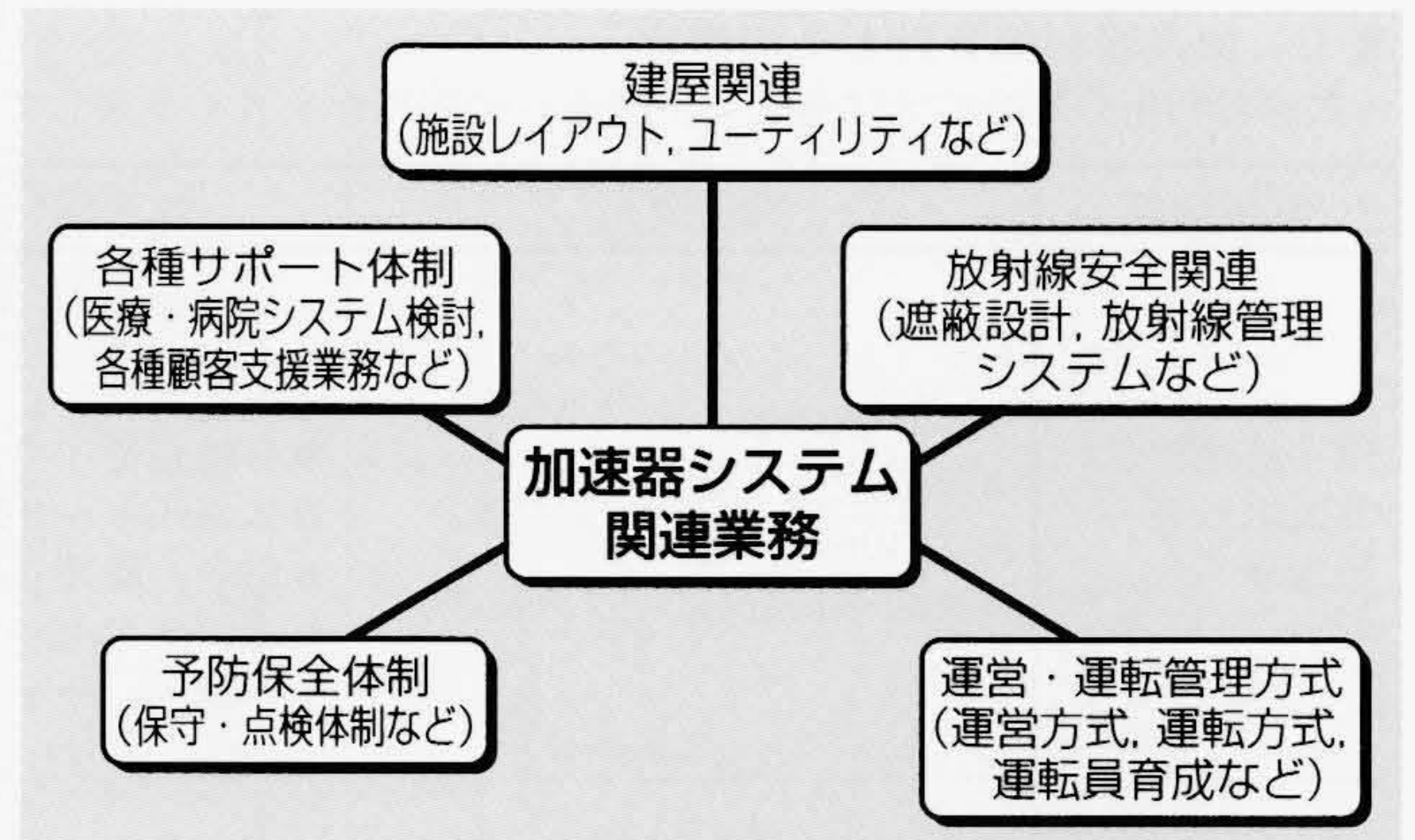


図2 加速器システム関連業務の構成

加速器システムを効率よく安全に稼働させるには、各種バックアップ業務の遂行が必須となる。

2.2 物質科学および材料工学

加速器からの光子、電子、陽電子、中性子、イオンビームそしてRIビームは、物質観察のプロブとして有効である。これらの粒子は、新材料開発、新機能素子創成、材料照射損傷研究などに威力を発揮する。具体的には、原子・分子物理学、結晶構造、表面、超電導などの研究や、半導体微細加工、イオン注入などの技術開発に使われる。

2.3 生物および生命科学

光子、中性子、イオンビームはDNA(Deoxyribonucleic Acid)やタンパク質の構造解析、さらに突然変異の発現などの技術開発に有力である。シンクロトン放射光は、タンパク質を含めて、生体高分子物質の構造解析や、ナノメートル微細領域での照射が必要な生物・生命科学研究などに使われる。中性子とイオンビームは、主に植物の発生分化機構の究明や突然変異育種に期待される。

2.4 医療

わが国では、がん患者数は2000年には47万人を超えると予測される。加速器の医療応用への歴史は長く、X線や電子線が多く用いられて成果をあげた。その後、中性子、 π 中間子、放射光、陽子そして重イオンビームが登場した。

陽子線や重イオンビームなどの荷電粒子線によるがん治療は、いずれも米国ローレンスバークレー研究所(LBL)で1950年代後半に臨床試行が開始された。荷電粒子線は、低侵襲性でがん患部への線量集中性に優れ、正常組織の損傷を軽減することができ、QOL(Quality of Life:生活の質)が高い。荷電粒子は体内に入ると、飛程の終端部で局所的に高線量領域(ブラッグピーク)を生ず

表1 加速器利用分野とその内容
加速器利用分野の拡大は著しく、医療への応用が大きく進展している。

利用分野	利用概要	加速器システム	加速器システム計画の代表例
原子核物理学 高エネルギー物理学	原子核物理学 ●不安定原子核構造研究 高エネルギー物理学 ●素粒子検証(ヒッグズ粒子)	原子核物理学 ●各種質量イオン使用 高エネルギー物理学 ●電子、陽電子など使用 ●高エネルギー大型	原子核物理学 ●RIビームファクトリー計画(理化学研究所 計画中) 4.5 T超電導サイクロトロン、周長約170 m蓄積リング 高エネルギー物理学 ●Bファクトリー計画(KEK, 1999年完成予定) 周長約3 km電子(8 GeV)・陽電子(3.5 GeV)シンクロトロン ●大型ハドロン計画(KEK・東京大学原子核研究所 計画中) 周長約1.5 km, 50 GeV主シンクロトロン
物質科学 材料工学 生物・生命科学	原子・分子物理学 物性物理学(表面・界面、構造) 超電導 半導体微細加工、イオン注入	シンクロトロン放射光利用 ●大型システム(集中設置) ●小型システム(多極設置)	大型放射光施設(SPring-8, 1997年供用開始予定) ●周長約1.4 km, 8 GeV電子蓄積リング
医 療	がん治療 ●陽子、重イオン(重粒子)	がん治療 ●陽子線治療小型システム ●重粒子線治療大型システム(HIMAC)	(1) 国立がんセンター東病院陽子線利用プロジェクト(1997年装置完成予定) ●235 MeV陽子サイクロトロン・回転ガントリー2セット (2) 福井県エネルギー研究センター(仮称)計画 ●周長33 m, 最高200 MeVシンクロトロン(医療など多目的利用) (3) 兵庫県立粒子線治療センター(仮称)計画 ●陽子(230 MeV), 炭素イオンシンクロトロン
原 子 力	放射性廃棄物消滅処理 ●超ウラン元素(陽子利用) ●長寿命核分裂生成物(光化学反応利用) 核融合材料照射損傷研究(中性子利用)	大型システム ●大強度陽子線加速器(超ウラン元素消滅) ●大強度電子線加速器(長寿命核分裂生成物消滅)	(1) 中性子科学研究計画(日本原子力研究所) ●1.5 GeV, 8 MW大強度陽子加速器 (2) 大強度電子線加速器計画(動力炉・核燃料開発事業団) ●10 MeV, 100 mA電子線ライナック (3) 国際核融合材料照射施設(日本原子力研究所)

注：略語説明 HIMAC(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba), KEK(文部省高エネルギー物理学研究所), SPring-8(Super Photon ring-8GeV)

る。この特性を利用して、がん患部の限定領域に損傷を与える。1996年前半現在、世界では17施設(陽子線16施設、重イオン1施設)で治療が実施されている。治療者数は世界で2万人を超えた。粒子線がん治療は、世界的にはまず、網膜メラノーマ、頭蓋(がい)内病巣、そして前立腺(せん)がんで実績が上がり、その後、肝がんや肺がんなどにも成果が認められた。今後、粒子線治療は体内深部がんの治療へと進むと考える。

わが国では、筑波大学陽子線医学利用研究センターが1983年から臨床研究を開始した^{2),3)}。また、科学技術庁放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置“HIMAC”によって1994年から炭素イオンビームによる臨床試行が行われている⁴⁾。

日立製作所は、2台のシンクロトロンの電磁石、電源、制御システムなどを納入した。いずれの施設も良好な治療実績をあげており、将来への期待は大きい。海外では、米国ロマリンド大学、マサチューセッツ総合病院(MGH)、スイスのポールシェラー研究所(PSI)が実績を誇っている。

2.5 原子力開発

近年、原子力部門では大強度陽子線加速器が注視されている。

原子力関係者は、軽水炉使用済燃料中の高レベル長寿命の超ウラン元素(²³⁷Np, ²⁴³Amなど半減期数百万年)の消滅処理技術の一つとして、陽子による核破碎反応を主に利用する技術開発を計画している。一方、長寿命の核分裂生成物(⁹⁰Sr, ¹³⁷Csなど)の処理には、大強度電子線加速器による光核反応を利用する方式を検討している。

3. 市場動向

3.1 原子核物理学および高エネルギー物理学

この分野は、今後も大型・高エネルギー志向(GeVからTeV)で進展する。文部省高エネルギー物理学研究所(KEK)は、現在KEK B計画(Bファクトリー)を推進中で、さらに、東京大学原子核研究所と協同で大型ハドロン計画も推進する。理化学研究所は、RIビームファクトリー計画を本格的にスタートさせた。

各計画の加速器システムは、それぞれ国内の1か所に

総力を結集して整備される。原子核物理学・高エネルギー物理学用の加速器は、予算規模が大きいため市場率(けん)引力がある。この分野は、今後、国際協力の重要性が認識されてくる。

大型加速器システムは、複数メーカーによる分担方式が基本となると考える。

3.2 物質科学・材料工学および生物・生命科学

この分野は、粒子を原子・分子レベルでの物質観察の探索プローブとして使用する場合と、粒子そのもの、または粒子の持つエネルギーの材料への注入に使用する場合に分れる。いずれも21世紀の基幹産業と深く結び付く。

この範疇(ちゅう)はユーザーが多く、かつ多岐にわたるため、大型もさることながら、小型システムを国内多数個所に整備することが期待される。現時点では大型システムの設置が先行し、兵庫県播磨科学公園都市内に日本原子力研究所・理化学研究所の大型放射光施設“SPring-8”の建設が進んでいる。日立製作所は、蓄積リングの電磁石(偏向電磁石中心)とアルミ合金真空チェンバ(偏向部中心)、シンクロトロン電磁石電源などを受注した。

大型システムは複数メーカーの分担体制が、小型システムは1社まとめが基本的方向となると考える。

3.3 医療

医療用加速器システムは、小型・高制御性で経済性に優れたものが要求され、国内多数個所への分散設置となる。システムは1社まとめで、ビーム保証までの受注が標準的になる。分散設置の場合は、陽子線加速器が主体となると考える。システム例を図3に示す。

国内の計画には、国立がんセンター東病院陽子線治療プロジェクト、福井県のエネルギー研究センター(仮称)のシンクロトロン施設、そして兵庫県立粒子線治療センター(仮称)がある。日立製作所は、福井県のエネルギー研究センターの加速器一式と、国立がんセンター施設の回転ガントリーと固定照射系各一式を受注した。福井県は、工業、医学や農林水産などでこの施設の多目的利用を目指している。国内では、自治体や大学が陽子線治療に名のりをあげることが予測される。

医療用加速器の設置は世界の流れとなっている。加速器の医療応用は、単に加速器だけを扱えばよいのではなく、加速器からのビームを患者まで導くガントリー、そしてビームを患者照射する際に必要な波形整形、ビームスキャンニング機構などの照射系、および治療計画ソフトウェアを含む。治療計画ソフトウェアとは、患者ごと

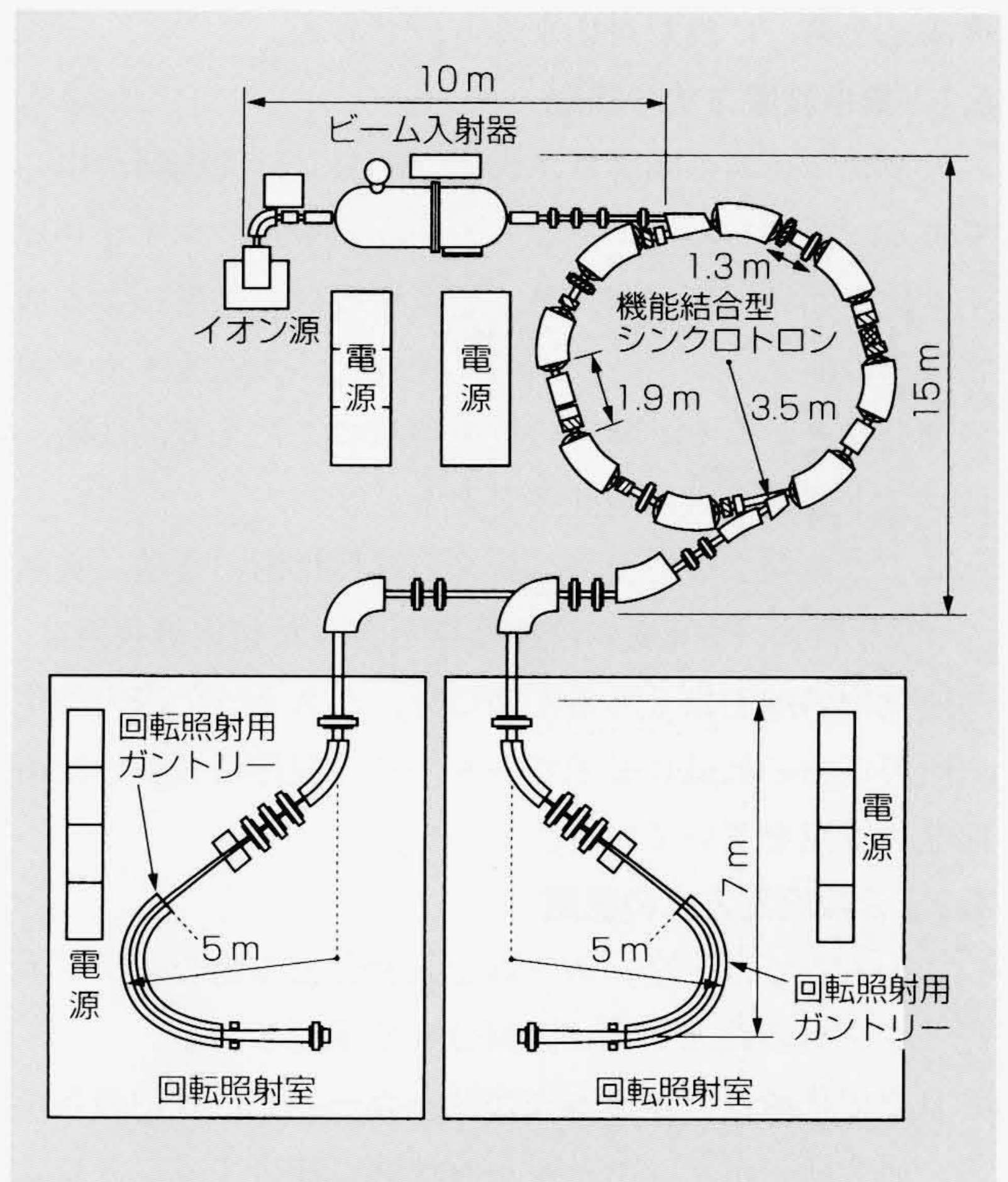


図3 がん治療用陽子線加速器のシステム例

小型・高制御性を追求した陽子線加速器システム例を示す。

に最適な治療方法を決めるプログラムである。

3.4 原子力開発

日本原子力研究所が、大強度陽子加速器を中核とする中性子科学研究計画を発足させた。超ウラン元素の消滅処理技術の開発のほかに、中性子による材料物性研究、原子核物理学研究なども行われる。当面は、施設の建設に力が注がれる。

一方、動力炉・核燃料開発事業団は、長寿命核分裂生成物消滅処理の基礎研究のための電子線ライナックの建設を始めた。また、核融合炉材料開発用の中性子源として、加速器利用中性子源(重水素・リチウム核反応)の国際計画が、国内では日本原子力研究所を中心に基礎検討が進んでいる。いずれの計画も大規模システムであり、複数メーカーの分担を主体とする体制下での推進となる。

4. 現状課題とトータルシステム展開

加速器システムには大規模システムの一極集中設置方式と、小型システムの多極分散設置方式がある。メーカーにとって集中方式は単品受注を主体とするサブシステムビジネス展開となり、分散方式はシステム一括受注のトータルビジネス展開となる。

日立製作所は、いずれのビジネス展開になっても、顧

客満足を第一に鋭意対応する方針である。

4.1 集中設置方式の課題

大型システムの顧客は、大学や国公立研究機関が中心である。課題としては、ビーム強度の増強、マイクロビーム化、高輝度化(放射光)、超電導技術の採用による加速効率の向上、高周波技術の高性能化、大電流イオン源の開発などがある。顧客の技術要求にこたえる高性能、低コスト要素の供給が肝要である。

ここで開発する技術は、将来の基盤技術の蓄積に貢献できる。特に、ヘリウム冷凍技術を含めた超電導技術は、加速効率の向上はもちろんのこと、システム効率の強化や所要電力の低減に必須であり、日立製作所もこの技術開発に重点を置いている。

4.2 分散設置方式の課題

この方式では、全システムを請け負える総合エンジニアリング力の確立が特に医療分野で重要である。

日立製作所は、加速器総合メーカーとして社内の各工場、研究所のポテンシャルを有機的に統合することにより、トータルシステム最適化能力を発揮する考えである。また、株式会社日立メディコと連携して、各種診断装置の詳細計画にも参画する。

課題を以下に示す。

- (1) 小型化
- (2) 高制御性(運転容易化、少人数運転)
- (3) 低コスト化(建設・運転・メンテナンス経済性)
- (4) 治療計画ソフトウェアの充実(プログラムの高性能化)
- (5) 建屋設計との整合性追求(加速器施設の合理的レイアウト、放射線遮蔽設計、放射線安全管理設計など)

今後は、原子力発電所電源立地県の地域共生、および地域がんセンター関連で各公共団体が立案する医療用加速器計画が急速に伸びると予測する。計画実現に向けた各種検討事項を図4に示す。

日立製作所は、基本計画の策定段階から各種のサポートを積極的に行い、顧客と一体感のある密接な対応に努める。

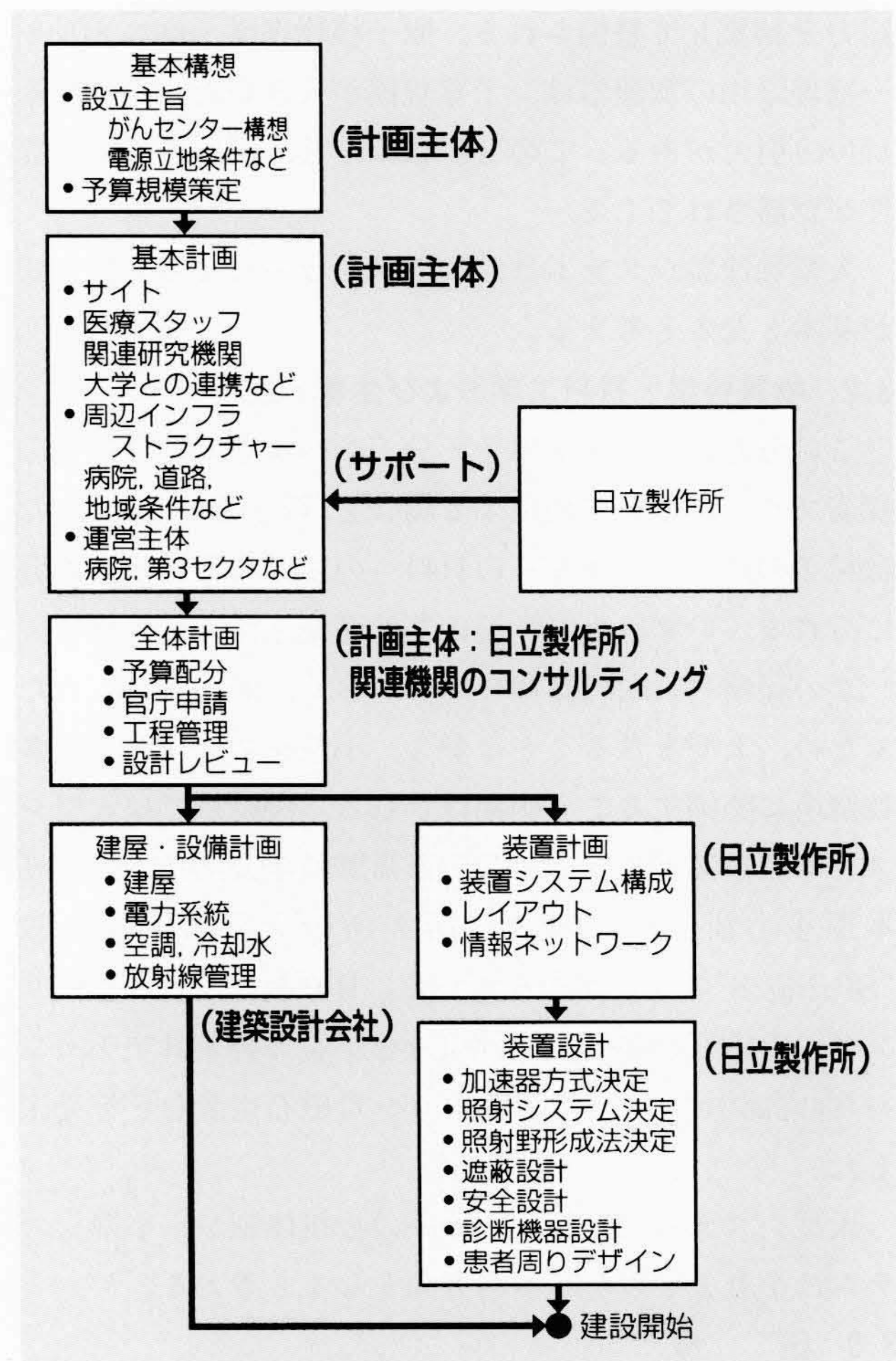


図4 医療用加速器システム実現のための検討事項

医療用加速器システムの実現には、基本計画段階からの顧客サポートが重要である。日立製作所は、すべてのサポートを積極的に行える体制を整えている。

5. おわりに

ここでは、加速器技術の現状、市場動向、課題、および日立製作所の取組みについてその概要を述べた。

日立製作所は、がん治療用加速器に注力し、広く福祉の向上の観点からこの分野に鋭意取り組む方針である。

今後も、新技術を取り込み、総合力を磨いて社会への貢献を目指していく考えである。

参考文献

- 1) 平成8年6月18日付 原子力委員会・放射線利用推進専門部会発表、原産マンスリー、8、59～86(1996)
- 2) 高田、外：陽子線によるがん治療の最前線1～6、薬局、南山堂(1994-12～1995-6)
- 3) 辻井：陽子線治療の進歩と展望、日本放射線腫瘍学会誌、6、63～76(1994)
- 4) 河内：医療用重粒子加速器の現状、日本原子力学会誌、38、8、650～657(1996)