

大強度ビームハンドリングと J-PARC の建設

田中万博

高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所
J-PARC センター素粒子原子核ディビジョン

Abstract

Some historical features of R&D of high-intensity beam handling for J-PARC, i.e. radiation resistant magnets and remote maintenance system, are briefly summarized.

1 はじめに

新しい加速器を建設して、新しい物理を始めよう！そういった思いを最初に強く感じたのは、大学4年生のころにニューマトロン計画を知った時だった。「ウラニウムを核子当たり 1 GeV まで加速して正面衝突させて圧縮し、核物質の新しい存在相を調べよう」という、今となっては当たり前の核物理の研究テーマも、当時としては、また核物理を志した初学者にとっては、画期的なものだった。大学院に進学するときに、「ニューマトロンで高エネルギー重イオンをやりたい」と訴えたが「それは君にはまだちょっと・・・」ということで、結局 RCNP の AVF サイクロトロンで、核子当たり 5~15 MeV の低エネルギー重イオン核反応での偏極現象を調べる事になった。結局 5 年後に、これで学位論文を書く事になるのだが、その間にニューマトロンはトリスタンとの競争に敗れ、その後は原子核分野の大型計画は実現できぬままに、大ハドロン計画、大型ハドロン計画、JHP、・・・と計画ばかりを練り直す日々を続ける事になる。その間に私は「ニューマトロンが出来ないなら、自分で出来る高エネルギー核物理を始めるしかない」と思い定め、運良く誘いを受けた KEK のちょっと古めの陽子加速器、120 億電子ボルト陽子シンクロトロン、KEK 12 GeV-PS、で仕事を始める事にした。

KEK-PS は核物理で使っていた加速器に比べて、その一次陽子エネルギーこそ高いものの、実際に実験に使う二次粒子である K 中間子などのエネルギーは高々数百 MeV 程度で、RCNP や理研のリングサイクロトロンなどと大きな違いがあるわけではない。つまり原子核屋が物理を考える上では手頃なビームである。しかし高エネルギー陽子で K 中間子などを生成する時には莫大なパワーを消費するわけで（といっても当時の KEK-PS は高々 3 kW くらいのビームパワーだったが・・・）、生成部やビームダンプ部、そしてリングの入出射機器の放射線や熱のコントロールはなかなか大変な作業であった。私は最初に呼んでいた東大理学部から、約 1 年後に KEK-PS のビームチャンネルという、まさにそういった機器の面倒を見る職場に移動していたため、放射線や熱の問題の困難を身をもって学んでいた。KEK-PS では K 中間子を用いたハイパー核生成や、稀崩壊の研究、さらには一次陽子を直接実験に用いるマルチフラグメントーションやベクトル中間子の質量変化の実験などを手がけた。純粹な実験屋さんは「蛇口をひねればビームが出る」という水道管的なビーム配給を理想とするかもしれないが、私は貯水池から蛇口の裏側までを作る立場だったので、同じ実験に従事しながらも、いろいろと人に知られない苦労を重ねていた。

ニューマトロン計画の挫折直後から立案されてきた大ハドロン計画、大型ハドロン計画などは、重イオンの加速のみならず、大強度陽子加速器を用いた大強度二次粒子の生成、利用が大きな柱のひとつだった。KEK-PS での経験や苦労を考えると、これらの計画は残念ながら机上の空論と言わざるを得ない。「数百キロワットのビームを用いて大強度 K 中間子を生成し」などと計画書には簡単に書かれているが、それを實際

に実現できる技術的な裏づけも、またそれを開発していこうという系統的な取り組みも、日本の核物理コミュニティの中には、全く存在しなかった。

結局だれもやらないし、だれもその重要さを認識出来ない仕事ならば、自分でやるしかない。そうしなければ大ハドロンだって大型ハドロンだって、その次の計画だって実現するはずがない。そう決心したのはニューマトロンの挫折から数年が経とうとしていたころだった。大強度ビームを用いて研究を進めるために必要なたくさんの事を、系統だって準備する。まず放射線や熱で壊れないビームライン電磁石などを作るための「耐放射線機器の開発」を始めた[1][2]。次に、それでも壊れた機器を安全に交換するための「リモートメンテナンス」の研究を始めた。多くの人々に理解される仕事では無かったが、幸いビームチャンネルの上司や同僚からは強い支持が得られ、仕事そのものは順調に推移した。最初のころにカナダのKAON 計画に参加するつもりでいろいろと基礎研究を進めたこと、次に KEK-PS に大強度ビーム対応の北(新)カウンターホールを建設できることになったこと[3]、さらには長基線振動実験のためのニュートリノビームラインを建設したこと[4]など、幸運にも私自身が手がけることとなつたいくつかの先鋭的実験施設の建設が、この開発研究を後押ししてくれた。それゆえ、ニューマトロンの挫折から 20 年、ついに JHP が JHF 計画となり、最終的には J-PARC という名前になる新型大強度加速器施設の建設が開始されるころには、ビームチャンネルグループの大強度ビームハンドリング技術は、世界でもトップレベルの評価を受けるまでになっており[5]、まさに準備万端整った状態であった。それでも「技術」を「設備」に昇華させるにはそれなりの苦労があったが[6]、十二分の準備研究に裏打ちされた技術的基礎体力は現実の建設をも何とか可能にしていったのである。

2 耐放射線電磁石の開発

「MIC の末端って、一体どんな構造になってるんでしょうね？」新設されることになった北カウンターホールのビームライン、K5 を設計していた時に、協力してくれていた仙台の電磁石メーカー、トーキンの技術者に対して、思わず私が発した言葉である。東カウンターホールに設置されているビームラインの内、かなりの大強度（といつても数キロワット）のビームが生成標的を照射する K2、K3 の先頭の電磁石のコイルは、完全無機絶縁ケーブル、Mineral Insulation Cable (MIC) を用いて巻かれている。ケーブルの断面形状などは国際電磁石技術学会などで発表された論文などで大まかな事は判るもの、その端末処理や曲げ加工の技術的詳細は殆ど明らかにされていなかった。MIC はその内部絶縁体として非常に潮解性の強い酸化マグネシウム (MgO) を使っているため、ケーブルの端末をハーメチック加工する事は、コイルの絶縁を保持するために必須の技術である。さらに線材の曲げ加工を誤れば、1 mm 程度の厚みしかない MgO 層はたちまち短絡を起こしてしまうと思われた。サンプルを入手しようとしても、当時世界で唯一 MIC を生産していたカナダの会社からは「量がまとまらないと売らない、ノウハウも開示しない」と全く相手にされず、「これはもう自力開発するしかない」と思い定めた。まず MIC を引いてくれる会社を探さねばならない。大手の電線会社がことごとく背を向ける中、大阪の熱電対のメーカーである岡崎製作所が、最初のサンプルを作ってくれた。わずか 1 m のサンプルであったが、世界最大の 2000 A 級の断面形状のもので、我々はこれで曲げ加工の試験や端末部品の試作や絶縁試験を行うことができた。その後、K 中間子の稀崩壊の実験を実施するため、急速新中性 K 中間子ビームラインを建設することとなり、ビームライン先頭の荷電粒子除去磁石を MIC コイルを用いて製作することになった。国産の MIC はまだサンプル以上のものが引けない状況ではあったが、曲げ技術、端末処理などに自信をもっていた我々は、カナダの会社から「まとまった量」の MIC を購入して、国内の電磁石メーカーでコイルに加工することにした。MIC の大量購入に関する国際入札も完了し、あとは納品を待つばかりという状態であったが、いつまでたっても納品されない。半年

遅れた状況でようやく部分的に入手できた MIC は、しかし生産会社自らが設定した対地絶縁電圧の仕様すら満たせない「不良品」だった。憤って交換を要求すると「カタログ仕様を変更した」「新仕様（低めの対地絶縁電圧）では合格している」「別に使いたくないなら特にかまわない」と、世界で一社しか生産していない強みで、なんら反省することなく引取りを要求してくる。結局コイル設計を変更して巻線毎の対地絶縁電圧下げることで何とか対応出来たが、こんないい加減な会社に耐放射線電磁石の基盤部品の供給を独占されていては大強度加速器施設の建設はおぼつかない。我々はこの事件を契機に、MIC の国産化を急ぐとともに、MIC に頼らない無機絶縁コイルの開発を強く決心した。

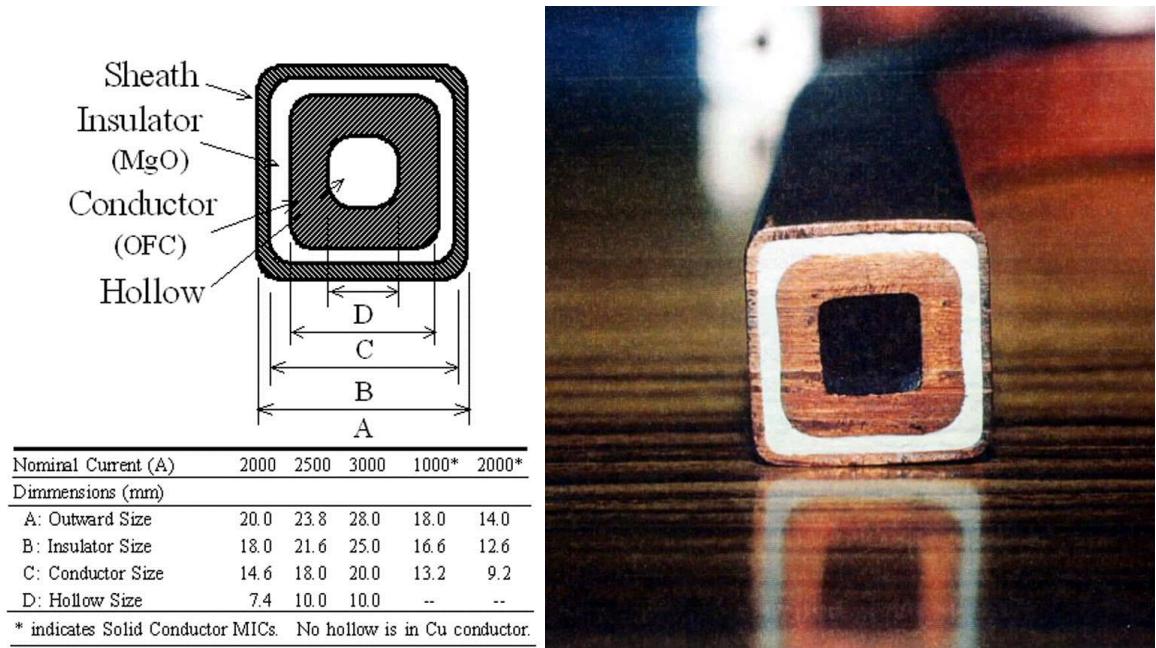


図1、国産化されたMICの仕様（左）と、2500A級MICの断面写真（右）

結局前出のK5の先頭電磁石はMICではなく、石綿テープにコンクリートを含浸させた絶縁材を素管絶縁用い、対地絶縁を兼ねてコイル全体をハイアルミニメントで固める、という構造を採用した。やはり空気中の水分がセメントに吸収されると、結果的にコイル絶縁が悪化する可能性があるので、コイル全体をステンレスの薄板で封止し、最終的にはコイル全体を真空中に引いた後に乾燥窒素で置換し密封する処理を行った。こうして完成した「コンクリート絶縁コイル」は、完成後20年以上たつが、コイル絶縁の劣化は認められていない。K5自体もKEK-PSの運転停止まで、順調に運転された。そうはいうものの、石綿に関する危険性の認識の高まりやコンクリート絶縁の取り扱いの困難さなどから、MICの国産化も並行して進めて行った。まず日立電線土浦工場の引き抜き機で30m長の2000A級、2500A級、3000A級MICの製作に成功し、少し時間が経って二段引きで60mまでのものが生産できるようになった。これで何とか、耐放射線電磁石の安定的な製作のめどが立ってきた。

耐放射線電磁石開発のもうひとつの取り組みとして、ポリイミド絶縁コイルの開発を挙げておきたい。MICは耐放射線性に関しては抜群の性能を有するが、導体の周辺にMgO絶縁体を有し、そのまた外側を、MgOに対する水分封止を兼ねた銅の対地絶縁層（鞘、sheath）で覆われている。それゆえMICコイルは鞘に誘導逆電流が流れることからAC駆動、つまり加速器用途に適さない。さらにコイル価格の点から、全ての磁

石を MIC 化する事も困難である。ビームロスの比較的少ない部分は何とか従来技術が使える有機樹脂絶縁が採用出来ないものかと考えてたどり着いたのがポリイミド樹脂によるコイル絶縁である。ポリイミドは、いわゆるカプトンの素材であり、有機樹脂としては最も耐放射線性に優れたものである。ただ樹脂として工業的に供給されておらず、エポキシのようなプリプレグテープとしての製品化もなされていなかった。ちょうどそのころ、ある雑誌の片隅に、「三菱ガス化学（当時）がポリイミド樹脂の一種であるビスマレイミド・トリアジン樹脂（BT レジン）のサンプル出荷を始める」という小さな広告が載った。問い合わせてみると、売る側も「どんな需要があるのか図りかねる状態」であった。そこでガラステープを提供し、BT レジンをプリプレグ状態で塗布したものを無償で準備してもらい、これを用いて磁石コイルの絶縁サンプルを作った。このサンプルを KEK-PS のビームを用いて 1 年以上かけて照射試験を行った。その結果、引っ張り強度においては従来のエポキシ樹脂含浸のものに比べて、一桁以上も耐放射線性に優れる事が判明した。その後、ビームチャンネルで製作する新規コイルはことごとくポリイミド樹脂をその絶縁に用いる事とし、ポリイミド絶縁コイル製造技術の確立を図った。ポリイミド樹脂はエポキシに比べて温度管理が難しく、樹脂の粘度が高温で著しく低くなり容易に巻き線部分から流れ落ちてしまうなどの問題もあったが、最終的にはモールドコイルの製造技術を確立することが出来た。その結果、J-PARC では加速器に用いられた電磁石の大部分が、このポリイミド絶縁で製作される事となった。もちろん 50 GeV 加速器からの外部ビーム輸送系の磁石は MIC コイル製のものを除いて、ことごとくポリイミド絶縁の磁石となっている。

3 リモートメンテナンス

リモートメンテナンスは、個々の機器を遠隔かつ自動で交換できることを目標としている。これは標的やその直近の磁石や真空ダクトなどの高度に放射化した機器が故障した場合に、迅速に正常品に取り替え、運転を続行するためである。耐放射線機器を開発することにより、このような交換の頻度は少なくなると予想されるが、人間が作る物なのである確率で必ず故障する。故障したときに交換不能、施設閉鎖、にならないためにはあらかじめ交換の手順、さらには施設全体のメンテナンスシナリオを考え、それが実行可能な形で準備しておかなくてはならない。その意味では、このリモートメンテナンスは、個々の機器の開発のみならず、施設全体の設計方針を定めるものである。J-PARC のハドロン実験ホールの設計にあたっては、まずこのメンテナンスシナリオを考えた。基本的には上方から天井クレーンによる操作ですべての機器が交換可能なように設計する。逆にそういうことが可能なように、天井クレーンの吊り上げ最大定格を定め、かつ磁石などへの配線、配管経路を定める。せっかく磁石をリモートメンテナンス可能に設計したのに、磁石の上方がケーブルラックや冷却水配管で埋め尽くされ、それらの撤去に何日もかかる、などという愚を犯さないためである。磁石などの個々の機器はプラグイン形式とし、上方からの嵌め合いでその位置精度を確保する。もちろん嵌め合いの下側は高放射化地帯に残ることになるので、あらかじめしっかりとアライメントしておく必要がある。機器の上方 3 m にサービススペースを設け、その中の機器の直上方でない位置に配線、配管経路を確保する。磁石などの機器は、チムニーと呼ばれる機構でサービススペースまでその冷却水や電力の端末を延伸させる。このチムニーの上端部とサービススペース内の配線、配管経路の間の電気、水の結合には、即着脱継ぎ手を有するバスバー、フレキシブル配管を用いる。これが我々が用意したメンテナンスシナリオである。

機器間の真空の着脱にはピローシールを用いる。ピローシールはそのオリジナルが 20 年以上も前ではあるがスイスの中間子工場 PSI で開発されたものである。私は PSI の技術報告書を読んでピローシールの先進性に感動し、わざわざ PSI まで出かけて、その発明者に直接許可を得た上で、我が国でコピーを製作した。もちろん我々なりに工夫をこらし、オリジナルより二桁以上良好な低リークレートを実現し、また有

効直径も1mに達する大型化を実現した。ピローシールもまた我々が国産化できるようにしたため、ハドロン施設のみならず、ニュートリノ施設、ミューオン施設などでも採用され、機器メンテナンスの自動化におおいに貢献している。

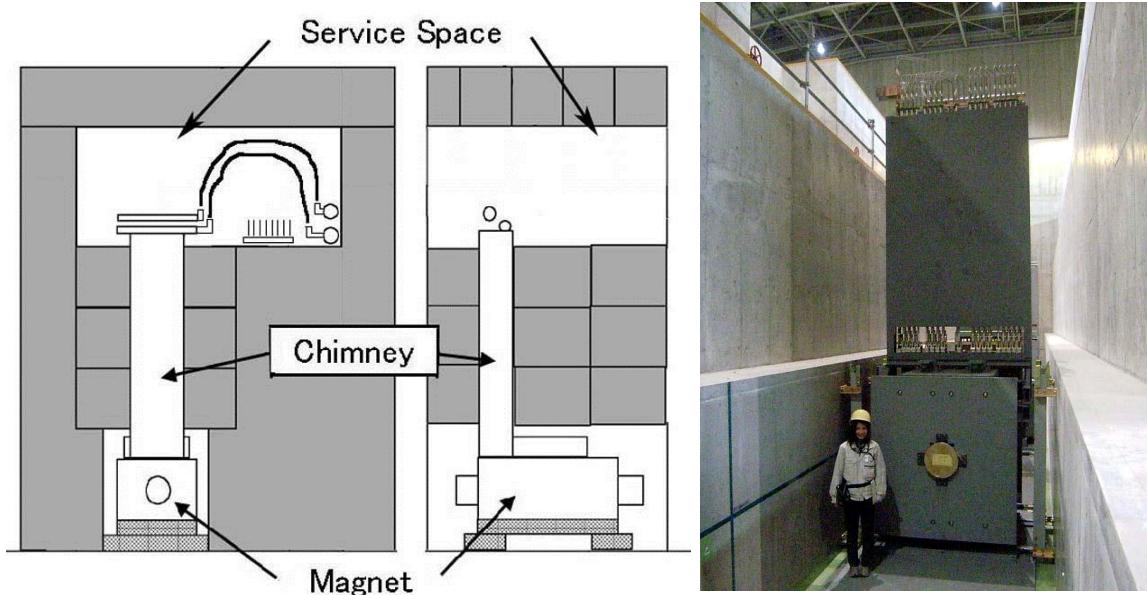


図2、チムニーを用いた電磁石の設置案（左）と実際のチムニー電磁石（右）

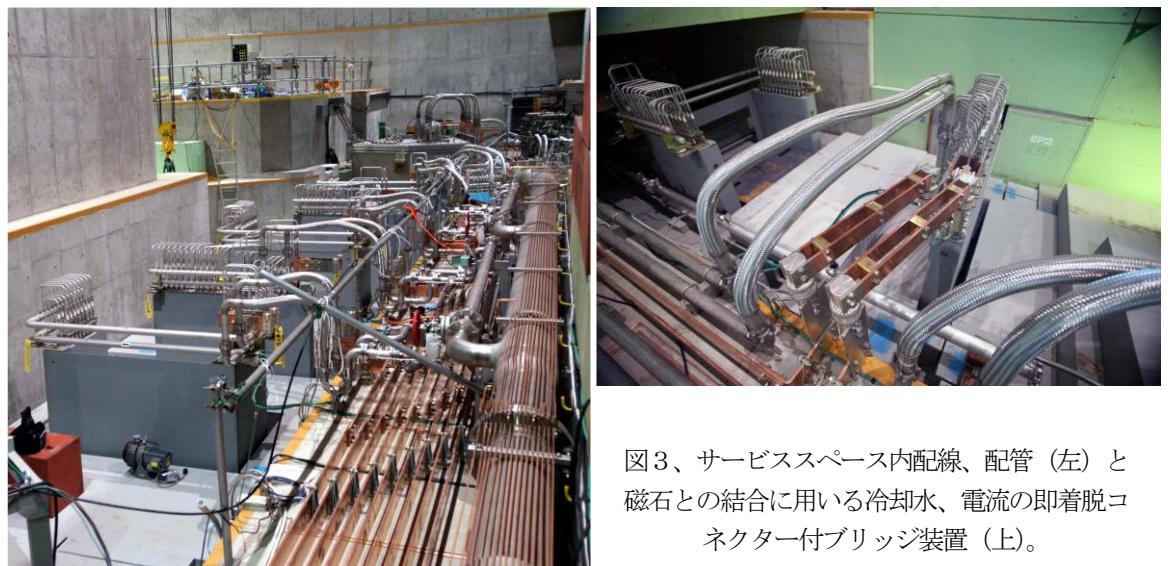


図3、サービススペース内配線、配管（左）と
磁石との結合に用いる冷却水、電流の即着脱コ
ネクター付ブリッジ装置（上）。

4 その他の細かな事柄

大阪で大学院生をしていたころは、実験装置は自分で設計して作るのが当たり前だった。お金がなかつたこともあるが、実験装置の隅々まで知り抜いていてこそ、最高の性能を出すことが出来る、という確信

がその根底にあった。KEK は比較的研究費には恵まれていたが、逆に装置の製作はメーカー丸投げの部分もあり、そこはかとない違和感があった。例えばビームチャンネルの仕事を始めたころ、ビーム形状モニターはワイヤーチェンバー型のイオンチェンバーで、かなり高価なものだった。高価であるばかりでなく、ワイヤーの断線でしばしば測定に困難をきたし、ビーム運転にも支障をきたすことが多かった。そこでイオンチェンバーの電極をタンクステンワイヤーから金網とフレキシブル基盤のパターンに置き換えたところ、価格が 100 分の 1 になったのみならず、形状の変更を含めた生産期間が劇的に短縮され、ビームライン上にいくらでも測定ポイントを増やすことが出来るようになった。もちろん、ワイヤーの断線による故障も無くなった。読み出し系も多チャンネル化に対応出来るように、一般的な工業用制御回路を用いるなどして低価格化を図った。このようなときに、やっぱり基本的な装置は自分で設計しなくてはと思う。

J-PARC で大強度ビームラインの設計、施工をしていた時も、「わが社に全部丸投げしてほしい。先生方には苦労をさせません」という大企業もいくつか現れたが、値段を聞くとこちらの想定より一桁ほども高かった。さらにはたとえ丸投げしたとしても、メーカーの保有する技術力、開発力では、とうてい完成させることが出来るとは考えられなかった。もちろん磁石などの量産時点ではメーカーの力を借りないわけにはいかないが、少なくとも基本設計は自分たちの力で行い、メーカーには性能仕様ではなく、製造仕様で発注する。これで何とか予算範囲内での「働く」施設の建設が可能になる。

大強度ビーム関係の設備も、「耐放射線性」の保障を求めるところ方もない価格になるが、例えビルや船舶のシステム配管用の配管材は、数十気圧の耐圧と、数百度以上の耐熱性を要求されることから、殆どが無機材で構成されている。これらはそのまま大強度ビームラインでの冷却水配管材として利用可能である。数百度の温度上昇を検知する温度スイッチは、自動車のエンジンのオーバーヒート検出用のものや、アイロンや家庭用焼肉機の温度コントロールに使われているものがそのまま利用可能である。量産品なので価格的にも安価で、逆に数千個～数万個の単位でなければ売ってもらえないほどである。密封型、解放型とともに存在するが、使用環境が酸化環境なので、密封型（ハーメチックタイプ）がお勧めである。完全無機材のみで構成されたマイクロスイッチは焼成炉の内部で使用するためにオムロンから大小 2 種類が発売されている。これを用いた完全無機の圧力スイッチも民生品で存在する。残念ながらマイクロスイッチそのものは開放型なので、取り付け時に多少の工夫が必要である。数千アンペアの電流の即着脱システムは、電車の密着型連結器に採用されているシステムを多少改造することで完成した。手動で開閉可能な完全無機の冷却水即着脱システム（20 気圧、2 インチ径）は、多少の開発が必要であったが、市販品のレバーカプラーと真空用のコーンフラットフランジの仕組みを組み合わせる事で実現できた。こういう部品を使えば、比較的安価に超耐放射線電磁石をシステムとして完成させることが出来る。

5 これから

ようやく大強度ビーム施設として、J-PARC ハドロン実験施設が完成した。これからは物理をしっかりと出す事である。しかし開発、建設が一段落して周りをみまわすと、またぞろ蛇口をひねれば K 中間子が出てくるのがあたりまえと思いこんでいる大学院生や研究者が増えてきているのに気づく。杉本研で学んだことは、まだまだ全く古くなっていない事に気づくとともに、基礎科学の振興にとって、本当は何が重要なのかを、私に常に思い起こさせてくれる。というわけで当分まだ憎まれ口をきくつもりである。

ところで、ハドロン施設は世界的な規模から考えると、余りに手狭で窮屈である。これは J-PARC の建設初期には加速器に建設資金をつぎ込まねばならず、実験施設は「必要最小限度のもの」を何とか建設できたにすぎなかつたからである。そこでハドロン実験施設は、将来的に容易に拡張が出来るように設計した。ビームダンプの設計に工夫を凝らし、一体化した状態で、一気に数十～百メートル下流に移動できる

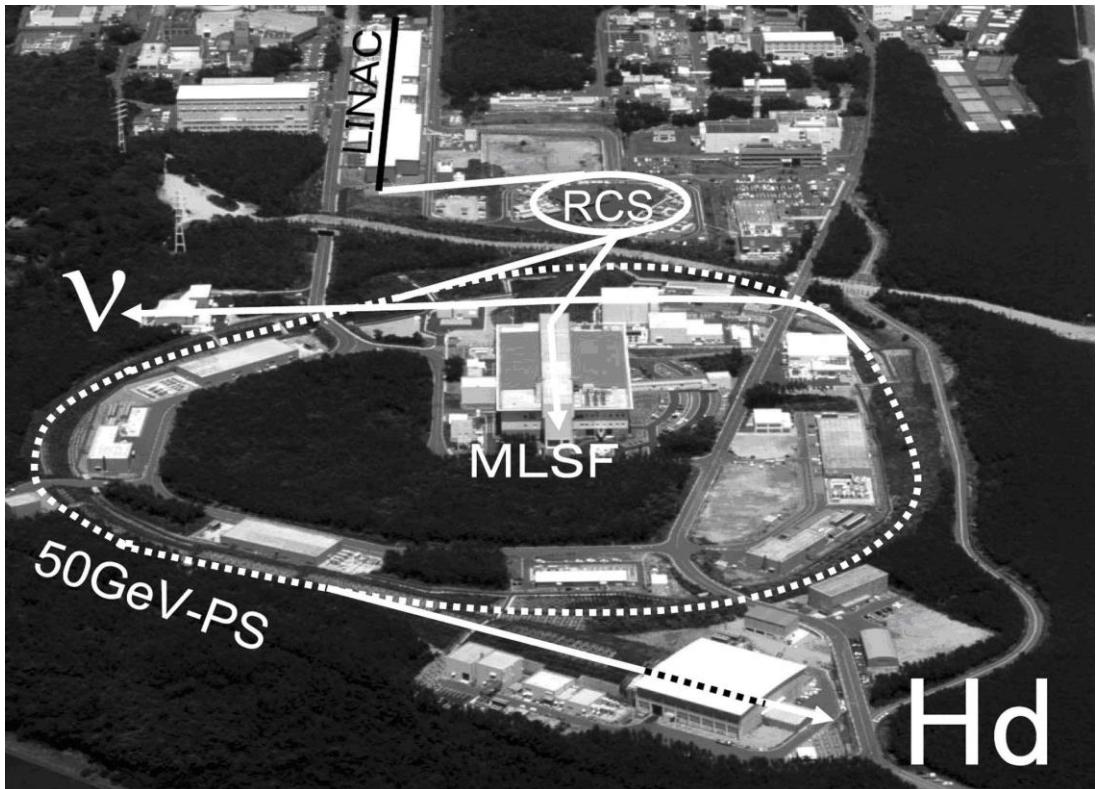


図4、東海に完成したJ-PARC。陽子ビームは400 MeV線形加速器(LINAC)、3 GeV高速シンクロトロン(RCS)、50GeV主シンクロトロン(50 GeV-PS)で第一期の設計エネルギーである30 GeVまで加速され、ハドロン実験施設(Hd)、ニュートリノ実験施設(ν)に取り出される。物質生命科学実験施設(MLSF)にはRCSからの3 GeV陽子ビームを用いた核破碎中性子源とパルスミューオン源が設置されている。

構造となっている。こうして拡張したホール内には生成標的を新たに2つ設置し、二次ビームラインも複数増設する。この拡張が完成して始めて、ハドロン実験施設は世界のハドロン物理の中心施設としての機能を有し、責任を果たせるようになるのである。ホール拡張にはしかし、今少し時間がかかると思われる。そこで現在のホールに設置されている1~2 GeV/cの低エネルギービームラインに加えて、30 GeVまでの陽子ビームや高エネルギーのπビームなどを取り出せる高運動量ビームライン(High-p)の設置を計画した。これにあわせて、 μ -電子変換によるレプトンフレーバー非保存を検証する実験(COMET)のためのビームラインも建設する。これは反陽子がバックグラウンドとなるため、8 GeVの一次陽子ビームを必要としている。幸いなことにこの二つのビームラインの建設は平成24年度の補正予算で認められ、間もなく建設に着手することとなっている。当分まだ忙しい日々は続きそうではあるが、今日すでに、ビームチャンネルの若い諸君の技量は私などのレベルをはるかに上回っているので、実はあまり心配はしていない。

References

- 1, K. H. Tanaka et al., Development of Radiation Resistant Magnets for High Intensity Beam Lines, Proceedings of 11th International Conference on Magnet Technology (MT11), Tsukuba (1989) p725-p730.

- 2, K. H. Tanaka et al., Radiation-Resistant Magnets for Hadron Experimental Hall of J-PARC, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 20, No. 3, June 2010, pp340–343
- 3, 中井浩二他、北カウンターホール使用に係わる放射線安全対策、KEK Internal 90-17 (1990).
- 4, 三浦太一他、ニュートリノビームライン施設の概要とその放射線安全対策、KEK Internal 98-11 (1999).
- 5, K. H. Tanaka et al., Radiation-Resistant Magnet System for J-PARC Hadron Experimental Hall, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 22, No. 3, June 2012, 4100204.
- 6, 田中万博他、ハドロンビームラインサブグループ第三次中間報告書、KEK-Internal 2007-1 (2007).

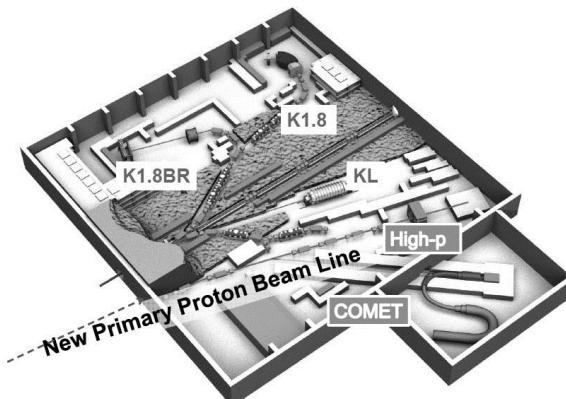


図5、ハドロン実験施設の模式図（左）。最上流部に置かれた生成標的から3本のビームラインに二次ビームが供給される。サイズはほぼ60m四方である。今年度からHigh-p、COMETの二本のビームラインが建設され、実験室の狭隘さはひどくなるばかりである。そこでホールを下流にむけて100m拡張する計画を立てた（下）。生成標的を二ヶ所増設し、特徴ある二次ビームライン多数と新KLビームを増設し、ハドロンならびに素粒子物理のメカを目指すものである。

