

# 加速器と土木

吉岡 正和\*

## Accelerator Science and Its Civil and Utility Engineering Work

Masakazu YOSHIOKA\*

### Abstract

In large-scale accelerator projects such as TRISTAN and J-PARC, approximately half of the total project costs are spent on the civil and utility engineering work for the accelerator. In addition, the quality of civil and utility engineering has a large effect on the quality of the beam. With increasing scale of projects, there is growing specialization of the people in charge of the accelerator on the one hand, and the people in charge of civil and utility engineering on the other. Mutual understanding between the people in charge is therefore important in such cases. From the experience I have accumulated working on the facilities of many large projects, I have become keenly aware of the necessity for both accelerator-literate civil engineering specialists and civil engineering-literate accelerator researchers. A straightforward method for satisfying this requirement is to systematize accelerator science as a science with civil and utility engineering for accelerators recognized as its sub-field. When new projects launched, the methodology of the natural sciences should be incorporated whereby past experience is fully utilized and then new technologies and knowledge are accumulated.

## 1. 加速器土木の必要性

### 1.1 はじめに

第3回日本加速器学会年会・第31回リニアック技術研究会<sup>1)</sup>で初めて「加速器土木」のセッションを設けていただいた。加速器土木という表現にしたが、土木に限らず、建築、電気、機械の全てを含むとお考えいただきたい。本稿では何故いま加速器土木セッションを提案したか、その理由、歴史、事例などについて述べることにしたい。

TRISTAN や J-PARC のような大型加速器計画は総建設経費のうち、設備も含む加速器土木におおよそ50%を割く。しかも加速器性能の高度化に伴い、土木・建築・機械・電気設備等の性能がビームの品質により大きな影響を与えるようになった。小規模加速器施設の場合は加速器担当者が全てを担当するケースが多いが、大規模になると加速器と土木・建築・機械・電気設備の担当者の分業化が進む。その場合、担当者間の相互理解が重要となる。筆者は TRISTAN はじめ偶々多くの大型プロジェクトの施設を担当してきた経験から、「加速器のわかる土木屋」と「土木のわかる加速器屋」の必要性を痛切に感じるにいたった<sup>2)</sup>。

それを満たすためには加速器土木を加速器科学の一つのサブ分野として認識し、学問として体系化することが正攻法である。新規プロジェクトを開始するに当たり、過去の経験を徹底的に生かし、その上に新しい技術や知見を積み上げる、という自然科学の方法論を取り入れるべきである。CERN, DESY, ORNL (SNS) の場合を調べたことがあるが、日本で言えば「施設部」にあたる部署が充実しており、技術・経験の継承と積み上げが系統的になされている。またプロジェクト指導者が「加速器土木」に詳しい。日本では施設担当者は行政職に属していることが多いため人事異動のサイクルが早く、専門職として積極的に人員を確保するよう、組織として制度を確立しているとは言い難い。また分業化が進み過ぎると「作る人」と「使う人」まで分業になる。加速器科学における進歩の原動力の一つは「結果責任」を負うことにある。加速器土木も含めて、作った人が実際に性能がでるまで責任を持つことで、はじめてフィードバックがはたらき学問として成立できる。小型医療用加速器などビジネスとして定着している場合を別にして研究用大型加速器は作って、引き渡して、任務終了という体制は馴染まない。

\* 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization  
(E-mail: masakazu.yoshioka@kek.jp)

## 1.2 PS, フォトンファクトリーおよび TRISTAN の経験

大型加速器プロジェクトは KEK の発足とともにそのスタートを切った。今日まで加速器土木という視点で加速器科学の歴史を概観する機会は少なかったので、ややスペースを割くことにする。1970 年代に KEK 初代の加速器、12 GeV PS が建設された。周長 340 m のシンクロトロンはそれまでの加速器に比べ 10 倍規模の技術的ジャンプでもあった。当時は研究所に強力な施設部がまだなく、文部省の工営課が施設建設を担当した。続いて建設された放射光施設フォトンファクトリー（建設期間：1978～1981 年）以降は KEK に置かれた施設部が工事担当となり、リニアックトンネル全長 500 m、蓄積リング周長 187 m の施設を建設した。次いで TRISTAN 建設（1982～1986 年）を迎える。周長 3 km の地下トンネルの建設はやはりそれまでの経験の 10 倍規模のジャンプであった。この PS、フォトンファクトリーおよび TRISTAN の 3 つの加速器施設建設を指導されたのが西川哲治氏である。西川氏は施設と加速器研究者の両サイドに相互理解を深めるような人材配置をし、プロジェクトマネジメントにも配慮したことなど、加速器土木の基本をつくり、次々にチャレンジを成功させてきた。ここに幾人かのキーパーソンの名をあげておく。フォトンファクトリー以降は KEK 施設部が建設担当となったが、中心となったのが力石壽士氏と西澤義雄氏である。PS 建設の途中から参加した同氏らは結局 TRISTAN まで担当し、TRISTAN 時に参加した霜田昌氏とともに中核をなした。この人たちが加速器土木の基礎を築いたのである。一方加速器研究者としてはフォトンファクトリー蓄積リングを指導した富家雄氏の名を挙げねばならない。富家氏はフォトンファクトリーのビーム軌道の変動（日較差）が建家屋根への日照の影響であることをつきとめ、施設部と協力して屋根に断熱を施すことによりその軽減に成功している。これは建築の構造とビーム品質との相関を明らかにした「加速器土木」のクリアな成果の最初ではなかろうか。

## 1.3 TRISTAN 建設とプロジェクトマネジメント

TRISTAN は地下 12 m に周長 3 km のトンネルを建設するという、土木工事として巨大であるばかりでなく、受電電圧 154 kV、使用電力 100 MW 級の特高電力受配電設備と、受け入れたエネルギー（熱）を最終的に電磁石や大電力高周波機器などから除去するための冷却水設備、空調設備も巨大である。これらを指

導したのが馬場齊氏である。TRISTAN 運転期間中、設備機器に特に大きな問題が生じなかったばかりでなく、基幹設備は KEKB にも引き継がれ、建設以来 25 年を経た今でも稼動している。このような適切な人員配置は西川氏の強力なリーダーシップで実現されたが、もう一つ強調すべきはプロジェクトマネジメントである。プロジェクト推進のためには様々なレベルの会議があるが、「TRISTAN 連絡会」ではプロジェクトリーダーの西川氏が自ら議長を務め、ここに加速器、物理研究者と施設関係者、管理部門が一堂に会して中身の濃い議論と、意思決定を行った。プロジェクトを進めるための会議とはかくあるべきである。ここでプロジェクトマネジメントに触れるのはあとで述べるように、加速器土木において重要な課題の一つである建設マネジメントにも関係するからである。わが国の加速器科学において西川氏をはじめとする戦後の第一世代の研究者は加速器土木について自然に意識しながら、大きなチャレンジを次々に成功に導いてきた。筆者はその次の世代に属するが、ここで改めて加速器土木について整理し、次の世代に引き継げる明確な形にしたいと考えて、本稿をまとめるものである。

## 1.4 電磁石のベースプレート、トンネルの精度

筆者が加速器土木の必要性を思い至るきっかけの一つを紹介し、問題提起としたい。わが国の大型加速器において電磁石を設置するのに、コンクリートの床に鉄板の「ベースプレート」を用いるケースが多い。これは CERN や Fermilab をはじめ世界の多くの加速器施設ではあまり見られない日本独特の「技術」である。最近も CERN に建設中の LHC トンネルを見てきたが、コンクリートの床は図 1 に示すように打ち放しで、その上に架台を直接マウントし、さらにその上に重量 35 トン、長さ 15 m の超伝導電磁石を載せている。Fermilab の TEVATRON も同様である。

筆者の理解では日本のベースプレートの原型は KEK の加速器トンネルの床構造にある。初めて加速器トンネルをつくる時、一般の地下構造物の工法、「ボックスカルバート」という中空、矩形の躯体をモデルとした。この工法では通常、躯体コンクリート（圧縮強度 210 kg/cm<sup>2</sup> 以上）の上にさらに床として「歩床コンクリート（圧縮強度 160 kg/cm<sup>2</sup>）」と称する、無筋でかつ強度も劣るコンクリートを厚さ 20 cm 程度打つ。これは水路や各種サービスピットを床に自由に切って造るためのものである。ところが、重くてかつ高い設置精度が求められる電磁石を軟弱なコンクリート上に設置するわけにいかないの、やむを得ず

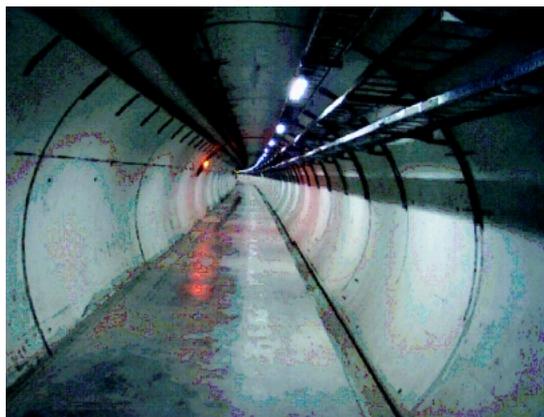


図1 CERN LHC トンネル

(左) : LEP 実験終了後, 完全に機器撤去後の状況. 床はコンクリート打ち放しである.  
 (右) : LHC 電磁石インストール中の様子. 左は搬送台車と電磁石, 右は設置予定場所.



図2 J-PARC 50 GeV シンクロトロントンネル (インストール, 設置作業中).

(左) : コンクリート床に直接設置された電磁石.  
 (右) : レベルおよび位置調整風景, 床と架台の間にライナーを挿入している.

躯体コンクリートから鉄筋を立ち上げて, その上に鉄板を溶接し (この鉄板がベースプレート), 歩床コンクリート上面と鉄板表面のレベルを合わせた. これが KEK のベースプレートの始まりである. TRISTAN では電磁石等の設置, アライメント作業への負担を減らすためベースプレートの設置精度として当初 $\pm 1$  mm という厳しい値を求めた. 土木工事で $\pm 1$  mm という精度は難しいということで, 妥協して $\pm 3$  mm としたが, 施工には相当の苦勞があった. その後 TRISTAN から KEKB へ移行するが, 電磁石の設置位置は TRISTAN と異なるため新たなベースプレートが必要となった. そのため 20 cm 厚さの歩床コンクリートを貫通させて躯体コンクリートに達するコア抜きを行い, そこにケミカルアンカーを打った. そうしてその上にベースプレートを取り付けて電磁石を設置した. 歩床コンクリートとベースプレートの隙間には無収縮モルタルを注入した. これが KEKB のベー

スプレートである. しかし KEKB において経費節約と工期短縮のため, ベースプレートを「追放」した部分がある. リニアックからリングヘビームを直接入射するため全長 130 m ほどの直接入射用トンネルを新規に建設したが, ここではそれまでの工法を変えたのである. 躯体と歩床コンクリートを二度に分けて打つことは床レベルを良い精度で仕上げるために有効な工法なので「歩床コンクリート」の考え方はこの工事でも踏襲した. 従来との大きな違いは, 歩床コンクリートにも鉄筋を入れ, かつ圧縮強度も躯体コンクリートと同様にしたことである. このことにより鉄板のプレートは不必要となった. コンクリート床は工場製作の鉄板プレートの面精度は期待できないので, 電磁石の架台底面とコンクリート床面との間には部分的に隙間が生じる. しかし, ここには薄い金属板 (シム) を入れて, 設置面積をできるだけ増やすようにした. 図 2 に示すように, この考え方は J-PARC の 50 GeV

シンクロトロン（以降、Main Ring, MR と称する）にも当初設計を変更してでも引き継ぐことにした（注：筆者は J-PARC 建設へは途中から参加）。この設計変更により相当のコストダウンと工期短縮を実現することができたと確信している。なお後でも述べるが MR は工事中の床レベルの不等沈下が激しく、周長 1.6 km のトンネルの最高点と最低点のレベル差は 50 mm もある。電磁石架台の調整可能なストロークは  $\pm 25$  mm 程度はあるが、それを初期の段階で食い潰すことは避けたかったので最高点の電磁石を床に直接設置し、それより低い位置では、ライナーを挿入してレベル調整した。

さて、ここでトンネルの工事精度、特にレベルについて考えたい。加速器で大切なことは、電磁石などの加速器機器本体の設置精度である。その基準を膨大なコストをかければ原理的には可能であるとはいえず土木工事の結果である床のレベルに求めることは合理的ではない。一方、通常機器は床に架台を設けてその上に設置するし、架台は工場製品であり、普通は位置調節機能をもたせる。架台によって必要精度を達成すべきである。整理するため加速器建設のコストがどの段階でかかるかを考える。

- ① トンネル建設（土木）
- ② 機器の架台製造（工場）
- ③ 機器設置作業と機器精密アラインメント作業（現場役務）

と 3 段階に分けられる。建設計画はプロジェクト全体の工程を考えるべきもので、それぞれの段階にかかる経費・工数の総和がミニмумになるようにすべきで

ある。KEK の初期の計画にこの考え方はまだ確立していなく、率直に言って J-PARC でもまだまだ不足している。土木工事を担当する人たちに加速器ビームの制御精度（ミクロン級）や電磁石のアラインメント精度（100 ミクロン級）のことを伝えると、それが直接土木工事に求められる精度と勘違いして驚かれる場合がよくある。逆に加速器専門家は、土木工事に mm の精度を要求すべきでなく、上述のような最適化が必要である、ということもまた、直ちに理解されるとも言い難いのが現状である。このことが「加速器土木」を改めて提案するきっかけの一つでもある。

## 2. J-PARC の経験

### 2.1 J-PARC のサイトの特徴

J-PARC は TRISTAN に匹敵する大規模施設である。建設は進行中で 2008 年 5 月にフルコミッション開始することを目標に、日々作業を進めている。ここでは大型加速器施設建設に当たって想定すべき多くの事項を経験しつつある。KEK の長年の経験を生かした面も、生かしきれなかった面もある。その「生々しい」状況を加速器土木の一例として紹介したい。

J-PARC サイトの種々の条件や地盤について述べる。J-PARC は KEK と、東海村にある JAEA 原子力科学研究所（原科研）の共同プロジェクトとして発足したこともあり、サイトは太平洋に面した海岸の原科研敷地の南側に決められた（図 3 左参照）。大型加速器建設用地としてフリーに最適条件を探して決定したわけではない。原科研南側敷地に相当の面積の領域が残されていたため、ここに中央地区にある既存施設

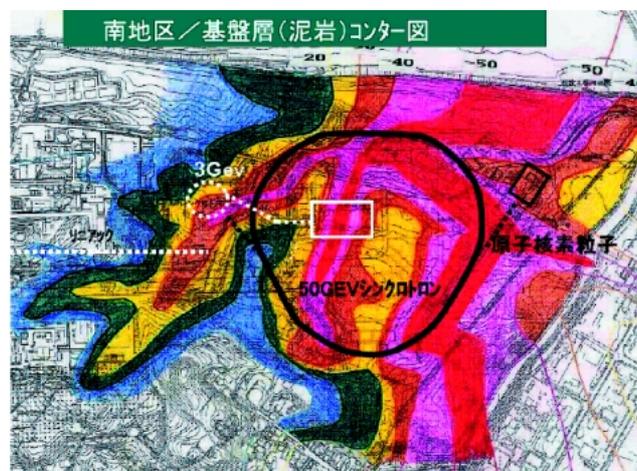


図 3 MR 全景

(左)：2005 年 9 月撮影の建設状況

(右)：泥岩の基盤層コンター図。埋没谷の複雑な様相が見られる。

との干渉を避けつつ、具体的な建設位置が決められた。東海サイトの地質は表層数メートルが砂層、その下に数10メートルにおよぶ砂礫層があり、基盤としては複雑な地形の泥岩層がある(図3右参照)。地盤の安定性、均一性はKEKのあるつくば地域より悪く、衝突型加速器や、精密なビームラインが必要な放射光施設には向かない。J-PARCは固定標的実験が目的の施設ということで問題にはならないと思われるが、このことで工事には多くの困難を抱えた。また工程の関係から、土木工事をやりながら加速器機器の設置も行うということになったため、トンネルの沈下、浮上が大きく、電磁石アラインメントなどに思わぬ苦労も強いられている。J-PARCの直面した様々な問題を列挙しよう。

- ① 那珂川、久慈川水系の中間に属し、そもそも地下水の豊富な地域。
- ② 海岸であり、氷河期、間氷期の交代により複雑に造成された地形、塩水化問題。
- ③ 貴重動植物や一級保安林との共存。環境保全。
- ④ 室町時代～江戸期の製塩遺跡の発掘調査。
- ⑤ 原子力施設との同居に伴う様々な制約。

2001年度にプロジェクトが発足して以来、まる5年経過した今、工事について当初計画から変更を余儀なくされた部分もあったが加速器に直接関係する土木工事はほぼ終了した。発注、設計、施工3者の大きな努力は敬意に値する。後で述べる地盤の変動や、トンネルの不等沈下など当初想定した範囲を超えるものがあるが、衝突型加速器ではないので、ビーム品質に深刻な影響は与えないと考えている。将来性能が上がり、ビーム損失を設計よりさらに少なくする必要が生じたときには問題になるかもしれない。今、究極の衝突型加速器とも言えるILC国際リニアコライダー計画の技術検討やサイトスタディがなされているが、特

に地質、周囲の環境等に関して、このJ-PARCの経験を教訓とし、シビアに考えるべきであろう。

## 2.2 J-PARC MR の設計、土木工事の特徴

設計の眼目は以下の2点である。

- ① トンネルの変形、変位をできるだけ小さくしたい。
- ② トンネルの健全性をできるだけ向上させたい。

できるだけ、と書いたのはコストを無視できないからである。ここで様々な技術選択に直面するが、その様子を紹介する。その前に、工事規模を示す数値を表1にまとめておく。トンネル建設工事は全て表面からの掘削による。一級保安林をかわしながら80万m<sup>3</sup>もの土量を一旦除去し、トンネルをつくり、最後にまた盛土として復元することは大変な苦労である。技術選択にあたっては表2に示すKEK加速器トンネルの経験を踏まえた。なお詳しい内容については文献2を見ていただくことにして、ここでは主な課題の概要を紹介する。

### ●直接基礎か、杭基礎かの選択

TRISTANは実験室を杭基礎、アーク部を直接基

表1 J-PARC MR トンネル緒元

トンネル周長	1.6 km
トンネル標準部内空	幅 5 m × 高さ 3.5 m
標準部トンネルコンクリート厚さ	底版 1.2 m, 壁 0.8 m, 頂版 1.0 m
トンネルコンクリート躯体最大厚さ	底版 3.5 m, 壁 2.8 m, 頂版 3.0 m
トンネル床面深度	TP-2.1 m (海面下 2.1 m)
掘削土量	80 万 m <sup>3</sup>
基礎杭数	1400 本
コンクリート量	11 万 m <sup>3</sup>
鉄筋量	1.2 万トン

表2 KEKにおける加速器トンネル

加速器施設	完成年	規模 (m)	基礎	セメント	防水
12 GeV PS	1974	340	杭	普通ポルトランド	アスファルトシート
電子リニアック	1982	500	杭	普通ポルトランド	アスファルトシート
放射光リング	1982	187	杭	普通ポルトランド	アスファルトシート
TRISTAN-AR	1984	480	杭	普通ポルトランド	アスファルトシート
TRISTAN-MR	1986	3000	杭, 直接	普通ポルトランド	アスファルトシート
ニュートリノ (K2K)	1999	250	杭	普通ポルトランド	アスファルトシート 及びコンクリート改質材
陽子リニアック	2000	93	杭	普通ポルトランド 一部低発熱	コンクリート改質材
J-PARC MR	2006	1600	杭	低発熱	コンクリート改質材

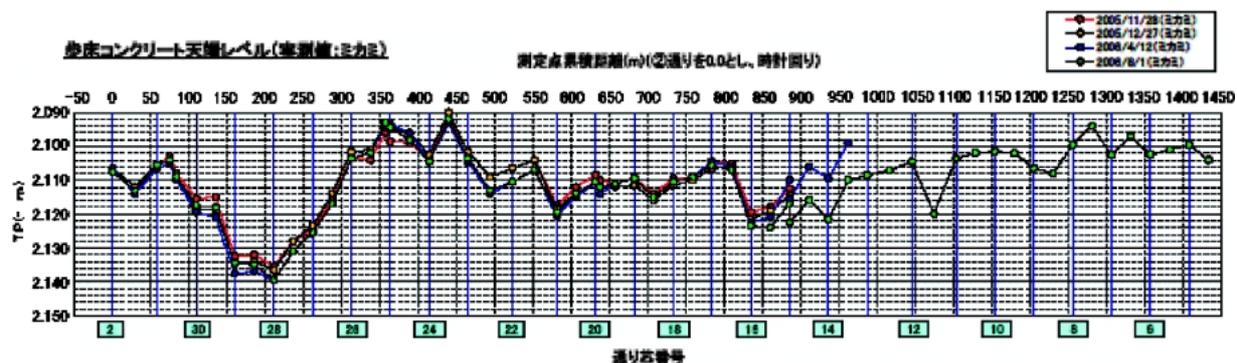


図4 MRトンネル床レベル測定値。横軸は1600mの1周を展開したもの。最高点と最低点の差は50mmある。特に大きなディップは中性子実験室へのビームラインの荷重で不等沈下した結果で、これを無視すればほぼ±10mm以内に納まっている。何回もの測定値にばらつきがあるのは、工事の影響で沈下や浮き上がりがあるため。

礎としたが、理由はそれぞれの床版が乗っている地盤の耐力にある。KEKサイトは粘土、砂、砂礫層が厚さ600mもの深さまで幾重にも重なっている。地下12mのアーチ部が乗っている砂層は固く、十分な支持力があって杭を打たなかった。実験室床は支持力が劣る地下19mにあったので、支持層に達する杭を多数打った。J-PARCでは図3右に示す複雑な地形の泥岩層を支持基盤とし、全てそこまで達する杭基礎とした。総数1400本におよぶ杭の長さは支持層の深さに合わせて場所により大きく異なり7~56mの範囲となった。このような杭基礎において杭の先端と摩擦支持力は概ね50%ずつとしたが、評価に用いた地盤のモデルが現実と異なれば結果は変わってくる。工事が完了した後に長期的にどうなっていくかを見ていく必要がある。

なお、工事期間中の床レベルの変動は相当に大きい。TRISTANでも経験したが、トンネル周辺を掘削すると浮き上がるし、逆に盛土によって沈下もする。量的には10mm以上になることは珍しくない。土木工事をしながら、完成した部分に順次電磁石をインストールするという工程を組んだのはJ-PARCが初めてかもしれない。平成19年12月からOff-beam commissioningを開始する予定であるが、精密アライメントを行う時間の確保が大きな課題となっている。

図4に示すが、核破砕中性子用ビームラインがMRトンネル上部を通っている部分は、その大きな荷重のため、40mmもの不等沈下が生じた。これは想定外の事象であったが、前述のように電磁石架台の下にライナーを挿入することで解決した。工事中のレベル変動は、ほとんど即時の沈下か浮上であるが、完成後の経時変化については地下水位変動による影響は設計に織り込んである。KEKBトンネルはその一部が年間

2mm程度ずつ沈降している。J-PARCにおいても毎年、電磁石の測量を行っていく計画である。

#### ●施工中の地下水対策

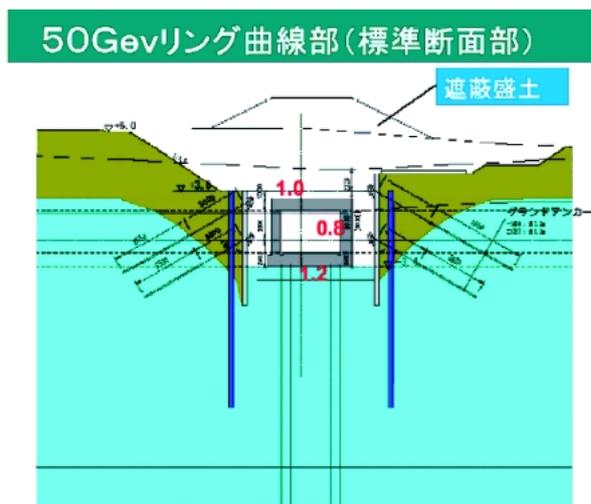
地下水対策は地下構造物の最大の問題といってもよい。課題は二つあり、工事中の遮水と、トンネルが完成した後の健全性である。工事中のことは全ての土木工事に共通であるが、完成後の漏水を極端に嫌うのは加速器トンネルに特異な要求であることを認識しておくべきで、加速器土木の必要な所以でもある。例えば地下鉄トンネルなどでは漏水をある程度許容しており、大江戸線など車両にワイパーが付いている。加速器トンネルは機器を濡らしたくないのと、加速器によっては放射化物（水の中にトリチウムができる）を増やしたくない、という二つの理由で限りなく漏水をなくしたい。

工事中の地下水対策は工事経費に関係するので技術選択には慎重を期す必要がある。工事のためには工事期間中を通して、地下水位を工事面より下げねばならない。MR工事は当初は最も簡単な方法の釜場工法で設計された。これは工事現場の一箇所を掘り下げて、地下水を集めポンプでくみ上げるものである。しかし、図5に示すように、現場の地下水量はとてこの工法で間に合うものではなく、ディープウエル工法という深井戸を掘って水を汲み上げ、地下水位を下げる工法に変えた。工事の最盛期には日量2万トン以上、排水した。

しかし、さらに地下水が多く、ディープウエル工法でも対応できない局面がでてきたため、いくつかの工区では地下水の浸入を防ぐため現場遮水壁で囲む遮水工法を採用した。誌面の都合で詳しくは文献1に譲る。強調したいのは事前調査の限界と、現場では想定外のことは起こり得る、という二点である。事前調査



図5 工事中の地下水対策  
 (左)：水没した現場（最初に手がけた工区）.  
 (右)：アースアンカーで固定したシートパイルで山留しディープウエルで地下水位を下げる。



は詳しいに越したことはないが、コストをどこまでかけるかの判断は難しい。J-PARCでは通常より高密度の調査を行い、最終的調査ポイントは80箇所にもなった。それでも想定外のことが起こる。大切なことは、こういう想定外の事態への対処の仕方である。我々は膨大な地下水に対する対策を検討するため、急遽、外部も含めて専門家に依頼しレビューを実施した。このやり方は、プロジェクトマネジメントの一方法として極めて有効かつ重要である。

●トンネル完成後の地下水対策

KEK サイトも東海サイトも地下水位が高くトンネルは常時水没している。表2にあるがKEKではアスファルト系のシート防水を長年ベース技術としてきた。しかし、残念なことに我々の経験では、この方式は「必ずどこかで破れる」。そこでK2K実験用トンネルではじめて無機質セメント結晶剤によるコンクリートの改質工法（触媒工法）を採用した。その後、陽子リニアック棟（現STF棟）と、今回のMRのほとんどの工区でこの工法を採用した。この工法は改質剤をトンネル外面全周に塗布するもので、クラックが発生し、水が浸入するとその水がコンクリートのさらなる水和反応を促して結晶がクラック中に増殖する、というもので自己補修効果がある。一方、シート防水や吹きつけ防水は一旦破れると手の打ちようがない。ただ、この改質工法は即効性に欠け、施工後に発生する大きなクラックには必ずしも有効でないということは要注意である。

●コンクリートの選択  
 (低発熱セメント)

コンクリートのひび割れ発生は宿命である。内的要因は水和反応による収縮と温度上昇、外的要因は何らかの外力と環境である。地下トンネルはトンネルを取り巻く外部の環境は安定している。トンネル内部の環境は空調により安定化させるが、これについては後で述べる。加速器土木の課題は、このひび割れを抑制または制御して、いかにして有害なものにしないかということである。有害ひび割れとは地下水の侵入(漏水)をもたらす貫通クラックのことである。まずはトンネルの基本材料のコンクリート、セメントの選択がトンネルの健全性を決定付ける重要項目である。表2にあるようにKEKではずっと普通ポルトランドセメントを使用していたが、J-PARCでは低発熱型セメントを用いることにした。その理由はJ-PARCのトンネル躯体の厚さは、表1にあるように放射線遮蔽のため極めて厚いためである。コンクリートは硬化する過程で発熱し内・外部に温度差が生じる。特に厚いコンクリートで普通のセメントを使用すると3日程度の短時間で最高温度に達し、中心部と表面の温度差は50℃にも達する。そうすると熱膨張による内部応力がコンクリート自身の引っ張り強度を上回り、ひび割れ発生の原因となる。このひび割れが局所的に集中発生すると貫通クラックとなるので、それを制御する配力鉄筋の設計をするのである。MRトンネルでは低発熱型セメントの使用により、温度差を緩和することが可能となり大きな効果があった。実際に高炉セメントに

よるトンネルと比較してみると、違いが一目で分かる。  
(低放射化セメント)

KEKのPSでは、機器の保守作業にあたって、被ばく軽減のため機器との距離を保とうとしたとき、トンネルのコンクリート自体が放射化していたことが障害になった。この経験を踏まえてJ-PARCではビームロスが不可避な部分では低放射化コンクリートを採用した。具体的にはコンクリートの放射化の主因であるNa成分の少ない石灰石を骨材として使用した。材料の採用は慎重な品質調査やPSによる照射試験を経た後に決定した。

### ●トンネル構造

TRISTANの設計段階でトンネルに伸縮継ぎ手(目地)を設けるか否かで議論を重ねた結果、50~60 m毎に伸縮継ぎ手を設けることにした。通常は地震やトンネル内部の温度変化(熱膨張)に対応するため、伸縮継ぎ手でそれを吸収する。また施工上も、施工管理上も伸縮継ぎ手があると、そこで区切ることができるため有用である。しかし、そもそも加速器トンネルが運転中に伸縮するようでは高性能加速器であればビーム運転には耐えないはずである。鉄やコンクリートの線膨張係数は $\sim 10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ なので、空調温度が $1^{\circ}\text{C}$ 変化すると1 m長の鉄筋コンクリートや1 m高さの加速器機器の架台が10 ミクロン変位する。余談であるが、精密機器を扱う場合にこの「 $1^{\circ}\text{C}$ , 1 m, 10 ミクロン」という尺度を頭に叩き込んでおくことと便利である。10 ミクロンという値は、衝突型加速器や、最近の放射光実験においては十分に気にすべき大きい値で、実際にKEKB加速器トンネルの空調温度は $\pm 1^{\circ}\text{C}$ に制御している。急な温度変化があると、直ちにビーム軌道に影響を及ぼす。TRISTANは8 GeVで入射し、最大32 GeVまで加速して衝突実験を行った。つまりトンネルの空調熱負荷がビーム入射時と衝突実験時で大きく変化する。空調システムはその変化を追従できるような高級な仕組みであったが、冬季にはあまりうまく働かなかった。理由はトンネルを負圧制御していたためで、あらゆる貫通孔から外気が侵入し、特に冬季に冷気が入ると温度制御は極めて難しかった。TRISTANは一リングに電子、陽電子ビームを蓄積していたので、外乱がある程度相殺され、何とか運転できたのである。常時換気したのは、真空ダクトがアルミ製であったため、強力な放射光が空中に放出され、オゾンと窒素酸化物が生成されたからである。温度変化による収縮を吸収する伸縮継ぎ手は本来トンネル軸方向の構造負担を軽減し、ひび割れ制御の役割を果たすべきであったが、TRISTANトンネル

ではいくつかの継ぎ手に軸方向の貫通クラックが多数生じて漏水の原因になった。これは継ぎ手部に応力が集中した結果であると推察している。トンネル空調温度を冬季 $22^{\circ}\text{C}$ 、夏季 $27^{\circ}\text{C}$ で制御していたが、この $5^{\circ}\text{C}$ の差は大きくて、伸縮継ぎ手部に大きな応力集中をもたらしたと考えている。おおよそ10箇所程度の貫通クラックからは絶えず水滴が落下するほどの漏水があった。しかしKEKBはビームエネルギーは固定されたので熱負荷が一定になった。また真空ダクトがアルミから厚さ6 mmの銅に替わり、放射光が空中に放出されなくなったので、オゾン等の生成がなくなり、換気の必要もなくなった。その結果外気の侵入も無く、通年で一定温度( $24^{\circ}\text{C}$ )に保つことが可能となったのである。これは安定運転に必須だけでなくコンクリートの大きな伸縮が減ったためTRISTANの時に「口を開いていた」貫通クラックが閉じてきて、漏水が劇的に減るという効果ももたらした。現在、漏水は皆無ではないが、絶えず水滴が落下する状態から、滲み出す程度まで改善している。

このような経験も踏まえてJ-PARCのMRトンネルは伸縮継ぎ手のない構造にするという技術選択をした。トンネルが完成し盛土が終了した時点でトンネル温度は東海の年間平均気温である $15^{\circ}\text{C}$ になる。加速器完成後の空調温度は $10^{\circ}\text{C}$ 高い $25^{\circ}\text{C}$ 程度で通年で一定に保つように考えている。これは機器のアライメント精度を保つことと、コンクリートの健全性を保つために必要である。設計担当の日建設計によりトンネル温度が $12^{\circ}\text{C}$ 上昇したときの変位のシミュレーションがなされたが、地中にあるトンネルは拘束されているので、それぞれ3箇所の直線部が3 mm伸び、アーク部が4 mmはらむ、という結果になっている。

### 3. 地盤の広帯域振動と変動

加速器土木のフィールドである地盤について理解しておくべきである。それはこれまでに述べた工事方法に関する技術選択のために必要ということもあるが、もう一つ重要なことはビーム品質への影響である。Bファクトリーでルミノシティが $10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$ を越える領域に達し、リニアックベースのX線自由電子レーザーの建設がDESY, SLAC, SPring-8(理研播磨)の3箇所始まり、そしてまたリニアコライダーの実現のためにも、地盤の性質をよく理解しておくことが益々重要になったのである。例えばKEKBでは地球潮汐の影響を考慮に入れた運転を日常的に行っているし、台風などによる気圧の変動にも注意を払って運転している。それに比べればJ-PARCは衝突型加速器

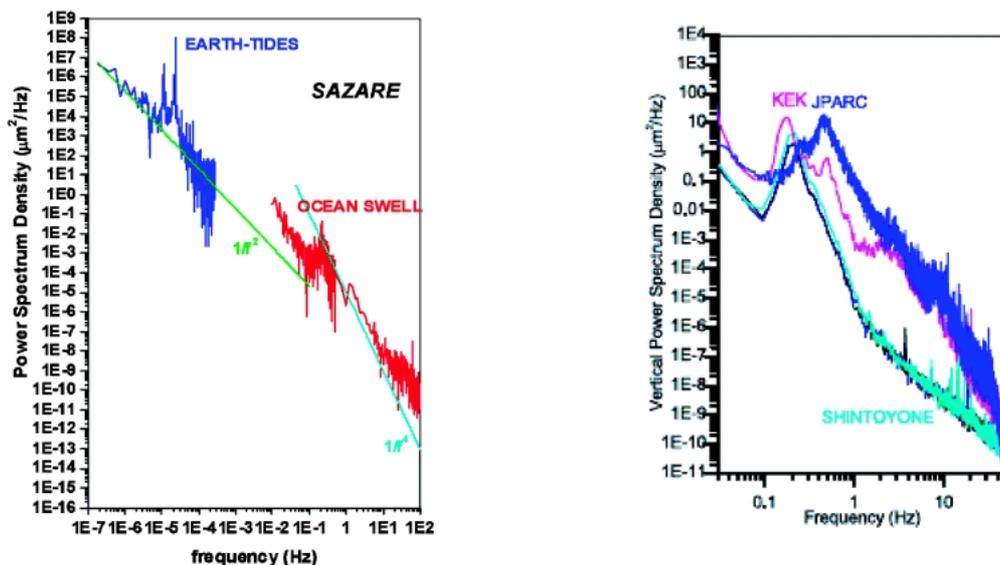


図6 地盤振動，変動の周波数依存性の例，竹田繁氏の測定。  
 (左)：測定場所は愛媛県佐々連にある銅鉱山跡のトンネル内で，地質はグリーンシスト。  
 (右)：STS-2 で測定した J-PARC の MR トンネル，KEKB トンネルおよび新豊根水力発電所地下空洞（花崗岩）の3箇所のサイトにおける垂直方向の地盤振動

でも，ミクロンサイズのビームを扱う放射光施設でもないのにビーム性能が地盤の変動に大きく影響されるということは，とりあえずはないと思われる．本章では地盤の広帯域振動と変動について概要を紹介する．詳しくは文献を参照いただきたい．

地盤は様々なエネルギー源により動いている．一般に不規則に起こる振動で，特に人が感じる周波数帯の振動を我々は地震と認識するわけだが，原因としてプレート運動によるもの，断層，火山性のもなどある．一方周期的な変動もある．図6に地質がグリーンシスト地帯の地下トンネルにおいて竹田繁氏らの測定したパワースペクトラムを示す．測定された周波数範囲は  $10^{-7} \sim 10^2$  Hz と9桁もの広い範囲に及んでいるのが特徴である．この範囲を1種類の測定器でカバーすることは不可能で，低周波部は竹田氏自らが開発した高精度水管傾斜計で，それより高周波側は地震計を用いて測定されている．地震計は8 mHz～50 Hzの，通常地震計と比較して特に低周波領域まで測定可能な Streckheisen STS-2 Seismometer という3軸速度計である．余談であるが，最近地震学の分野でもようやく低周波振動まで研究の対象となってきたが，このような広い範囲にわたる系統的測定が加速器の専門家によって，先駆的になされたことは注目に値する．その目的はリニアコライダー建設に必要な基礎データ，知識を得るところにある．図6の特徴の一つは，2つのピークが見られることと10 Hz前後の領域

における変化である．それらは低周波側から順に，地球潮汐，波浪の影響，そしてカルチャーノイズである．もう一つは0.1 Hzを境にして低周波側の振動は  $k_1/f^2$  で，高周波領域は  $k_2/f^4$  で表すことができることである．係数  $k_n$  は地質に大きく依存し，安定な岩盤であれば小さい．これらの振動，変動は地球の弾性変形，弾性波として伝達する．一方，例えば地球潮汐のような大規模な変位はほとんど弾性変形であるが，エネルギーの一部は塑性変形に消費され地盤のブラウン運動的な変動をもたらす．その程度はサイトの地質に大きく依存する．広い範囲で均質な硬岩地帯（一枚岩）と，岩盤が砕けた軟弱な地盤を比較すれば，後者のほうがはるかに大きなブラウン運動を示すことが定性的には理解されよう．図6のデータから卓越成分を除去して詳しく解析し，ランダム成分を抽出することができる．その結果を，直線距離  $L$  の二点間の，時間間隔  $T$  における変動の二乗平均を  $\sigma^2$  とし， $\sigma^2 = ATL$  と表すことができる． $A$  はその地盤を特徴づける係数である．高品質ビーム加速器の場合，地質によっては機器のアライメントあるいは軌道補正を施すべき最小時間間隔を考えねばならない．理論的には V. Shiltsev, A. Sery, 山本昇らがフラクタル理論によって説明している<sup>3)</sup>．この3人とも地震や地質研究者でなく加速器研究者であること理由は先に述べたことと同様である．

図6(右)にSTS-2地震計で測定した地盤振動の

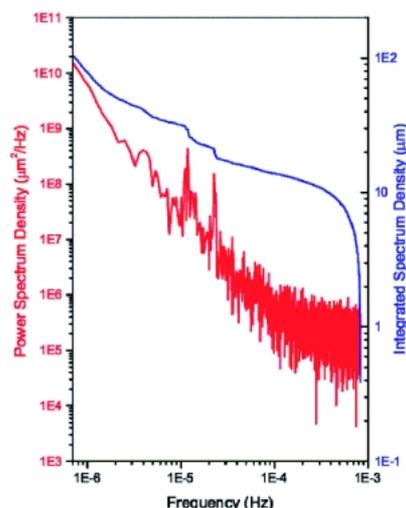


図7 水管傾斜計によるMRトンネル床レベル測定  
 (左): J-PARC トンネル内に設置した水管傾斜計。  
 (右): 計測データを蓄積しパワースペクトラムとして表したもので、ピークは海洋潮汐と一致する(竹田繁氏による)。

データを示す。3箇所のサイトで測定したが、新豊根水力発電所地下空洞は花崗岩の安定な岩盤地域で、振幅が小さい。大きなピークは波浪の影響であるが、これまで竹田繁氏が日本の各地で測定をされたデータではピークは0.2 Hz 近傍にあるが、東海サイトは振動が大きく、ピーク位置も0.5 Hz にシフトしている。海岸立地であることを実感させられた。これも文献1の竹田氏の報告に詳しい。

J-PARC トンネル内では工事中の床レベル変動が $\pm 10$  mm 以上にもなるほど大きく、アラインメント作業に苦勞している。その変動状況をリアルタイムで測定するため、数100 m の範囲に図7に示すような水管傾斜計を設置して測定した。盛土を載せると即時沈下が起こることなどいろいろわかったが、驚くべきことに海洋潮汐の影響が大きく現れた。振幅はトンネル内の位置により異なるが、最大で $100 \mu\text{m}$  近い。恐らく、加速器運転には影響は無いと思われるが、中性子の精密実験などが始まれば、考慮の対象となるかもしれない。

加速器プロジェクトを新規に考えるとき、そのサイトの地盤の動きについて、よく調べておくべきである。

#### 4. 加速器トンネルの建設マネジメント

加速器土木の最後に、発注、施工の形態について二つ問題提起をしたい。

(設計と施工)

加速器の土木建築はそれが「公共工事」である場合、

設計、施工の分離が原則である。「公正さを確保しつつ、より良いものを廉価でタイムリーに調達する」ためだが、しかし、「本当に」分離してしまうことは合理性に欠けるのではないだろうか。考えてみれば、加速器機器製造の場合、設計と製造を別々に発注するというはまずないし、発注者は絶えず製造現場に行き、設計者と製造技術者と協議する。既述したように、現場では想定外のことが次々に起こるし、工事には最新の技術を絶えず取り入れるべきである。①加速器(利用者)、②施設担当者(発注者)、③設計会社(コンサルタント)、④施工会社(ゼネコン)の4者がいるが、これに⑤施工管理を入れた5者の協議を随時行うことにより、現場の状況に柔軟に対応し、かつ施工管理をしっかりと行うことによって高い品質を維持することが必要である。大きな課題として図8に示すような設計・施工一括方式の体制に変えていく、ということの問題提起したい。

(仕様規定から性能規定へ)

橋梁や道路などの一般土木の世界では「仕様規定」と言って、様々な管理基準を設けて構造、材料、施工方法などを具体的に規定していく方法がとられており、加速器土木も現状では例外ではない。しかし最近の傾向としては目的物に求められる性能を規定する「性能規定」にしようとする動きがあり、建築などは既にそうなりつつある。仕様規定の場合、同じ仕様のもを確実に作ることは向いており、これまでそれなりの役割を果たしてきたが、施工管理の仕方としてはどうしても設計図書に示された構造物の仕上がり寸



図8 設計・施工分離と、一括方式の比較

法を重視した「出来形管理」になり，また加速器のような特殊な要求がある場合や，臨機応変の対応，新技術の積極的導入には向かない．我々は加速器土木の分野が，設計・施工一括方式と性能規定方式を組み合わせることで，土木工事の一つの新しいスタイルの先駆けとなることを志したい．

### 5. おわりに

本稿は KEK の竹田繁，宮原正信，東大の入江正明，日建設計の加藤隆の各氏との共同作業をベースとしてまとめたものである．本来ならば共著とすべきところであるが，時間の制約もあったので筆者単独の文責でまとめることにした．J-PARC 工事に関わる様々な情報は KEK 施設部および J-PARC 建設に参加されている JV 各社の皆様から教えていただいた．その詳しい状況は文献 2 を参照いただきたい．

今回は誌面の都合でほとんどの記述が土木に限定されたが，本来であれば空調，冷却水，特高受電配電システムなどにも同等のスペースを割くべきであった．次の機会を待ちたい．また今後 SPring-8 をはじめとするわが国の経験や海外の状況なども報告していただき，それらを系統的に整理して加速器土木のベースを構築していくことを提案して稿を閉じたい．

### 参考文献

- 1) 第 3 回日本加速器学会年会・第 31 回リニアック技術研究会で最初の加速器土木のセッションが開かれ，以下の 6 人の口頭発表があった．この中で特に榎本，竹田，加藤，宮原，入江の各氏の論文は本稿をまとめるにあたり，ベース資料とした．  
 榎本 收志，他「ILC 施設」  
 竹田 繁「地盤の広帯域振動と変動」  
 加藤 隆，他「加速器トンネルの設計」  
 宮原 正信，他「加速器トンネルの建設マネジメント」  
 入江 正明，他「加速器施設におけるコンクリート構造物の要求性能」  
 鈴木 良一，他「産総研電子加速器施設のエネギー消費半減化」  
 松井 佐久夫，他「放射光蓄積リング空調ファンコイルの電源電圧変動による電子ビームの日周期変動」
- 2) 季刊「文教施設」2006 年第 21 号 p. 100~116  
 吉岡 正和「大強度陽子加速器計画 J-PARC について」  
 田村 彰教「計画施設の設計概要」  
 宮原 正信「計画施設の建設概要」
- 3) 地盤のランダムな動きに関する文献  
 V. Shiltsev, "Space-Time Ground Diffusion: The ATL Law for Accelerators, Proc. IWAA95, KEK, Nov. 14-17, 1995, pp. 352-381.  
 A. Sery and O. Napoly, "Influence of Ground Motion on the Evolution of Beams in Linear Colliders", DAPNIA/SEA 95-04, August 1995.  
 S. Takeda, N. Yamamoto, K. Oide, "Ground Motion Studies for Large Future Linear Colliders", Proc. PAC97, May 12-16 (1997) Vancouver, pp. 3660-3662.