

加速器と機械工学

—「ものづくり」からの加速器研究者への要望—

人見 宣輝*

Some Comments to Accelerator Scientists from Mechanical Engineering Field

Nobuteru HITOMI*

Abstract

In order to get helpful support from mechanical engineering field, it is important for accelerator scientists to show clearly a road map with technical milestones about their program and a revised map when any alterations are made. It is also meaningful to upgrade technical specifications and engineering drawings according to progress of research and to establish a technical network.

1. はじめに

加速器の研究者と一緒に仕事をしたのは、筆者が高エネルギー物理学研究所共通研究施設工作センターの教授として赴任した1997年3月1日から2003年3月31までの6年間である。その期間にサポート部門に所属する者として主に関係したプロジェクトはXバンド加速器のJLC/NLC計画^{*1}であり、高エネルギー加速器研究機構（以下高エネ研）が大学共同利用機構になる直前まで、かつGLC計画¹⁾への移行までであった。

加速器研究のサポート役として「ものづくり」の立場でのプロジェクト参加の経験から、加速器科学に携わる研究者への支援を効果的にするため、加速器研究者へ要望すべきもの、また当然ながらサポート部門として心得るべきものは何かについて検討した結果について述べる。それらは(1)ゴールまでのロードマップを徹底する、(2)このマップにはマイルストーン、課題を明示する、(3)状況に応じてマップを修正しかつ共有する、(4)仕様書、図面を整備する、(5)決められた担当者は責任を持って研究を推進する、(6)ネットワークを活用して研究資源を有効に使うというような内容となった。これらの当たり前なことを常に留意することによって、加速器研究者とサポート部門担当者がベクトルを揃えてプロジェクトを円滑に進めることができるも

のと思われる。

非常に短い期間の特定のプロジェクト経験しかない筆者の傍系からの小論であるが、今後の研究活動に何らかの参考になれば幸いであると考えている。

2. 研究フェーズと機械工学のかかわり

2.1 研究フェーズ

加速器の研究の進展につれてサポート部門の関わり方も当然変わってくるはずである。その研究の進展によって変化する研究の状況変化を研究フェーズとして、基礎研究フェーズ、開発研究フェーズ、実験設備設置フェーズと分類して見る。なお、設備が設置された後の実験開始後も加速器としての研究は当然続くであろうし、次の世代の加速器についても先行的に研究がおこなわれるであろうが、ここでは「ものづくり」という立場でこのように分けてみた。

これらのフェーズの特徴は「ものづくり」の視点で見ると生産（試作）の規模の大きさ、要求仕様の確かさ、研究計画の精度あるいは確かさ、その日程管理の厳しさなどによって表1のように整理できる。

基礎研究フェーズ、開発研究フェーズにおける基礎科学の研究所や大学の研究の進め方はそれぞれ永年にわたって構築されてきた手法が最も確実で安心できるものであろう。しかるに実験開始という大目的が確定すると、その実現のためにおこなう研究は明確なター

*1 www.linearcollider.ca:8080/lc/vic04/plenary/barry_barish.pfd 参照

* 独立行政法人 科学技術振興機構・研究成果活用プラザ宮城 技術参事
Japan Science and Technology Agency, Innovation Plaza Miyagi, Research Manager

表1 研究フェーズによる特徴付け

| フェーズ | 基礎研究 | 開発研究 | 実験設備設置 |
|--------|------------------|------------------|---------------|
| 生産規模 | 一品料理 サブシステム規模 | 複数個 システム規模 | 量産規模 |
| 要求仕様 | 未定、候補決め | ほぼ確実 候補絞り込み段階 | 確定 細部仕様 |
| ロードマップ | 流動的 個別計画レベル | 若干流動的 共有 | 明確 共有 |
| 日程管理 | かなりゆるい | かなり厳しい | 厳守 |
| 運営組織 | 大きい枠はあり 個別の組織 | 専任マネージャ 自由度あり | 高機能 意識の一体化 |

ゲットと実現のプロセスがあるはずである。研究のフェーズによって加速器研究者の研究運営のスタンスが変わるように、これをサポートする立場の機械工学研究者・技術者も同様に考えなければならぬと考えている。

この視点で見てみると筆者が加速器研究に関与したのは X バンド加速器の基礎研究後段から開発研究にかけてのフェーズであろうと思われる。

2.2 基礎研究フェーズにおける新技術への挑戦

加速器研究者が加速器の新規構造などの研究を開始し、これに関して予備的な実験をするために装置を製作する段階に当たる。研究機関や大学などの所属機関の加工担当部署である工作センター（現在の高エネ研では機械工学センター）、企業などに依頼し、まさに一品料理としてこれを実現することになる。

このフェーズでは全体の計画も流動的であり仕様も固まっていなかったために、加速器研究者の要求は非常にチャレンジングなもの、高いレベルのものとなる。したがって、この開発にあたるサポート部署にとっても技術の高度化や新しい分野への挑戦の機会ともなっていると云えよう。

1990 年頃にはすでに高エネ研の工作センターではミラー切削、研磨、計測の研究で育成してきた超精密加工技術があり、これを加速器研究者が提案した X バンド加速器のディスクセル加工に適用することを図った。

当時のセンター長の小泉晋教授と東保男助手は超精密旋盤の開発、ダイヤモンド工具や切削油剤の選定、加工精度におよぼす加工環境解析などの膨大な先行研究と実際の加速管作りを通して実質的な技術の構築をおこなった。

接合についても、加速器の高精度な RF 特性を出す

ために接合後の変形を最小に、かつ密着度を確保するために、各種の接合方法を試みた。

加速管接合法としては S バンド加速管の電鍍法²⁾と並んで接合実績のあるロウ付け法³⁾、接合面に金や銀のインサート材をスパッタして、これを溶融して接合する方法、さらにはインサート材の接合後拡散を利用する方法なども評価した⁴⁾。

これらは接合すべきディスクを 700°C から 900°C あるいはそれ以上の高温と軸方向推力による無酸素銅の変形があるので、これを小さくするための常温接合も試みられた。すなわち接合面をダイヤモンド切削後、メカノケミカル研磨^{*2)}をおこなって得た Ry 0.0005S^{*3)}の平滑面を真空チャンバに入れて 100 eV のイオネンルギーの Ar を照射し表面の酸化膜を除去し、推力をかけて常温で接合する、いわゆる界面接合⁵⁾のトライアルもおこなった。

このように多角的な実験研究を繰り返しながら、その中で比較的安定した結果が得られる拡散接合を将来の量産などにも耐えうるプロセスとして選定した。

すでに拡散接合については多くの研究者の基礎的、応用的な研究がされてきたが、再度接合強度、真空特性などについての接合実験を繰り返し、これらの結果をもとに 1996 年に三菱重工業(株)三原工場の真空炉において 850°C を 4 時間保持して 130 cm 長の DS 加速管の接合に成功した⁶⁾。

2.3 開発研究フェーズにおける絞り込んでいく技術研究

基礎研究段階に加速器研究者があるときには、「ものづくり」の面でも広く技術をサーベイしていくが、ある程度計画が具体化してくると、日程、仕様などをより具体的なものとして、それに沿った研究に転じていくことになる。研究は全てが計画通りにいくことはありえず、状況に応じて修正していくことは現実問題として当然のことであるが、原則的にはそれらの研究活動が収束していくようにマネージされなければならない。

特に本稿では基礎研究フェーズのあり方について述べるつもりはなく、X バンド加速器での経験をもとにゴールが見えてきた開発研究フェーズの場合に限定

*2 SiO₂ の超微粉を分散させた過酸化水素水液中で弾性体でできた回転体を工作面に近づけて発生させた液流中の超微粉末を工作物に衝突させ、あわせて液と工作面との化学反応を利用する研磨法。

*3 Ry は表面粗さ表記のひとつで、最低の谷底から最大の山頂までの最大高さ粗さを示す。この場合これが 0.5 nm である。

して論じる。

3. ロードマップ

3.1 ロードマップの必要性

高エネ研の X バンド加速器に関する加速器科学の研究者側では高田耕治と峠暢一が研究全体を統括し、肥後寿泰が加速管ストラクチャの開発研究を担当した。サポート部門としての工作センターでは加速管ストラクチャの試作と技術開発に筆者と東保男、久米達哉、技術部工作課の舟橋義聖、高富俊和、渡辺勇一ら多くの技官が超精密加工、接合、計測などの「ものづくり」の基礎的あるいは将来の量産を指向した研究および試作作業に従事した。

筆者が 1997 年に X バンド加速器のプロジェクトに参加したときには、おおよそ 2010 年頃に大型の直線加速器を建設するので、それまでに加速器のストラクチャを作る技術を確立するという要請であった。

加速器研究者からは DS 型から DDS 型, RDDS 型, HDDS 型と新しい型式の加速管が順次提案されてきた⁷⁾。研究の進展や発生する課題に応じて形状や精度などの要求値が次第に絞り込まれてくる中、試作をおこなないながら超精密加工と接合の研究を継続してきた。

このように加速器研究者からは多くの試作要求があり、このときには個々の加速管の数ヶ月にわたる試作から 1 年にもわたる実験に関する綿密な日程が提示されてきた。しかしながらそれらが全体の流れの中でいかに位置付けられるものなのかが、必ずしも判然としなかったというのが当時の印象であった。

一方、「ものづくり」担当の工作センターや企業が試作日程遅れを出してしまった場合、加速器研究者は明らかに苦慮していると推察されたが、最終的にあまり厳しい追及や原因究明などはなされず仕舞いとなっていたことが多々あった。これは大きな研究の流れ、すなわち「ロードマップ」を明示してターゲットとそれまでの道筋をサポート部門に徹底し、共有することが不足しているため、加速器研究者もサポート部門の担当者も日程に対する切迫感が薄弱となっていたためと思われる。

このロードマップに基づいた研究運営になっていなかったために、基礎研究フェーズの時間感覚が開発研究に移行しても抜けきれず、また、その運営法がプロジェクト遂行への強い原動力となるという効果が理解されていなかったためと思われる。

筆者は現職で研究サポートという立場で大学の教員の研究遂行行動を見ているが、これと同様な日程やな

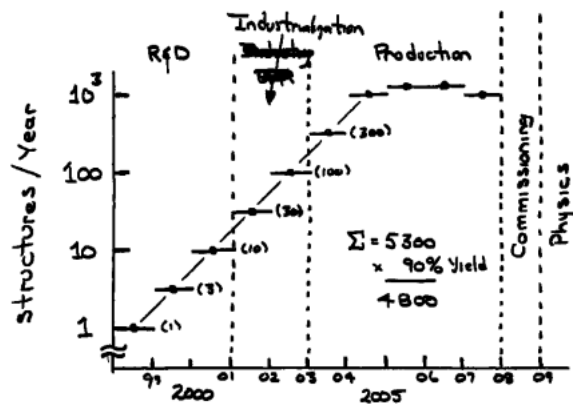


図1 Dave Burke の生産計画表

すべき事項に無頓着な研究者が結構多いように感じている。この事実は基礎科学分野だけでなく一般に大学研究者の一部に良く見られることなのかもしれない。

3.2 目に見えるロードマップ

筆者が X バンド加速管の全体計画として生産数と年次の書かれたロードマップを意識したのが 1998 年に高エネ研で SLAC メンバーとおこなった ISG 会議で SLAC の Dave Burke がホワイトボードに書いたものが初めてであった。これは図 1 に示すようなもので、厳密な議論をして書いたものではなく、また状況変化ですぐに計画が先送りになってしまったが、製造についての研究をする者にとっては具体的な形で流れを知る上で大変有益なものであった。

このように感じたのは、その時までビジュアルに日程が記載されたロードマップが手元になかったので、研究の流れについての確実さのようなものが持てなかったためと思われる。

2003 年に ACFA の会議が開催され、GLC の日程が明確に設定された。その中でも各パート毎の日程も提示され、ストラクチャでは 2006 年に量産の見通しを立てるというところまで規定された日程的には大変厳しい要請となっていた⁸⁾。

このようなロードマップは初期の段階から判っている範囲で作成し、開発の関係者に徹底することが重要であると考えられる。このプランは状況変化により延ばせるものは修正、どうしても変えられないものは代替の手段を講じて日程を確保していくなどの行動を取るための重要な鑑になるものであると考えている。

4. マイルストーンの設定

Burke のロードマップ、GLC の日程表について述べたが、実はこのロードマップだけでは不満足なのである。

その理由は実際の加速管の加工の見通しを得られる2006年の時点で、どんな課題が解決されていなければならないか、それを最終的に得られるために技術をどのように解決していくかの道筋と達成の課題を明示したマイルストーンが明確に設定されていないからである。それがないとプロジェクトマネージャも研究者も進捗の程度を把握することが困難となり、最後になってできないことがわかるというようなことになりかねないからである。

当然ながらXバンド加速器のような大きいプロジェクトではストラクチャだけでも加速器研究者、サポート部門の研究者のそれぞれの分担分野のサブシステム毎に作成したサブシステム・ロードマップをマイルストーンも含めて作成させて管理していくべきであることは言うまでもない。

前述した拡散接合については、その後多くの接合実験を繰り返した結果、外周部に接合不十分な箇所が観察されることがあった。この対策として比較的高い推力を加えながら接触点での低温拡散接合をする試みとして、1998年に石川島播磨重工(以下IHI)において130 cm DDS 加速管の試作に推力500 kgf、雰囲気温度150°C、48時間で仮接合をし、推力24 kgf、雰囲気温度890°C、24時間の本接合をおこなった。その結果は接合面にボイドが残るなどの欠陥が若干あったが全体としては良好な接合が可能と判断した⁹⁾。引き続きRDDS 加速管ではさらに改良した条件で図2に示すような真空タイトな加速管を接合することができた。

これは結果的には成功したものの仮接合の有効性、本接合の条件の確定などについては明確に評価せぬままに放置されてしまった。例えば、仮接合の有効性を明確にすべしということが関係者の意識にはあっても、プランの中に明示されたマイルストーンではな

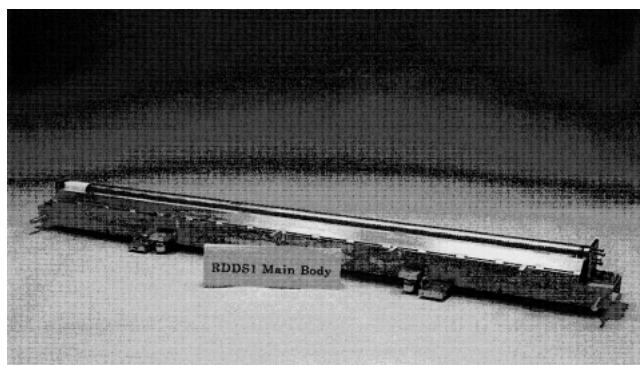


図2 ツーショット接合によるRDDS 加速管

く、かつ共有されていなかったので追求が不十分となっていたと反省させられる事実である。

すなわち、ただ物ができて成功ということだけでなくマイルストーンとしての課題がクリアされて成功ということにしなければ加速器建設に必要な工業化データは得られないからである。

5. ロードマップの見直しと課題出し

5.1 ロードマップの見直し

2000年になると高電解試験の課程でDS2 加速管の中で発生したピットの問題からブレイクダウンの研究が大きく取り上げられるようになった。研究の進捗に従って加速器研究者の重点課題もこのように想定していない方向に推移してくるが、ロードマップにおける位置付けについての議論なしにかなりの研究資源がこの分野に投入されるようになった。

これは、加速器として非常にバイタルな問題であるから結果論的には適切な資源再配分であったと思うが、計画を見直すことによる他の課題へのしわ寄せがどの程度かということを見積もって、それを意識して運営がされなかったということが問題であったと思われる。

工作センターとしては当時ブレイクダウンに対応して計画を見直し、関係の実験供試品の製作と合わせて洗浄問題に注力することとし、超純水による高圧洗浄のディスク表面清浄化の効果¹⁰⁾、また切削剤や表面処理によるアウトガスの状況解析もおこなった¹¹⁾。さらに加工の清浄化については関西大学の樋口誠宏との共同研究で低酸素分圧雰囲気加工法の基礎的な研究として成果を取めた¹²⁾。

予測していなかった事態に対して新たに研究をおこなうことは当然出てくるが、1999年に試作した直径φ61、厚さ9のRDDS型¹³⁾のディスクのアイリス部の楕円形状断面の加工のときには工具の刃先丸み半径の値をメーカ測定値でNC制御⁴⁾データに入れたのは輪郭度⁵⁾がクリアできことが確認された。このために工具精度を高精度に測定する必要がでてきたため、厳しい日程の中で球面転写法でサブミクロン精度で計測をする技術を開発し日程への影響を最小に押さえ

⁴⁾ 数値情報により工作機械の運動を自動制御する方式をいう。この場合旋盤の工具の刃先円の中心が工作物の指定の輪郭を加工するときに描く中心軌跡を定義するため、輪郭線と刃先円半径などを入力する。

⁵⁾ 理論的に正確な寸法によって定められた幾何学的輪郭面(線)上を公差域を直径とする球(円)の中心を移動させたときにできる許容輪郭面(線)。

た¹⁴⁾。

2003年ACFAのGLCのロードマップは2012年から直線加速器が発足とあり¹⁵⁾、Burkeのロードマップのコミショニング2008年、物理実験2009年と極端な乖離はない。また後送りになっていることは国際的な決定機関により決まってくることなので違和感はない。なお、このマップの右上の「直線加速器が発足」の赤い枠の左端の始まりの2012年の位置もいかなるフェーズなのか定義が明確でないので共有化するにはまだ不明瞭である。ちなみに、2002年の同じ図¹⁶⁾を見るとこの位置は10年も遡った2002年にあり、明らかに定義の違いがあることが推察され、このようにゴムのようなロードマップでは鑑にすることは困難である。鑑をあやふやなものとして扱うと、結果はあまり厳しく評価されず、締切はゴムでできたようなものとなり最終ゴールの実現が困難になってしまうことになる。

一方、サブ・ロードマップ段階で考えると、従来よりゴールが先に延びたら、(1)今の研究を遅らせるのか、(2)今まで優先度を落としておいた課題を拾い上げるのか、(3)余裕が出た分研究者を多く投入して重点課題研究をさらに加速し充実するのかなどの決心をするチャンスでもあり、研究計画の見直しと精度アップの機会であることには変わらない。

筆者などは日程が延びれば日常のタイトな日程で泣いていたので、肩の荷が軽くなったという安易な気分になっていたのではないかと反省している。これがロードマップによる管理を徹底していればプラス思考で対処できたのではないかと考えている。

5.2 新しい課題の設定

研究課題の見直しは別な切り口からもできるはずである。2001年当時、筆者が90cm加速管を4年間で10,800本生産するという前提で、それまでの試作時に得られた各工程の時間からディスク1枚当たりの加工時間に換算した値を整理した結果が図3である¹⁷⁾。すなわち、この時間が揃ってくれば各工程がバランス良く進むことになり、短ければ能率が高いということになる。例えば、この時間短縮に着目することにより研究課題が抽出できる訳であるが、機械を沢山投入すれば時間が下がり、見かけの時間は短くなるがコストは上がるので課題もコストとのバランスで決まってくるはずである。

この図からディスクの粗加工、仕上げ加工とも桁違いに時間がかかっているのが、フライス工程^{*6)}では小径工具の加工能率向上、バリ除去能率向上ないしは塑性加工も含めたバリなし加工などの課題が考えられ

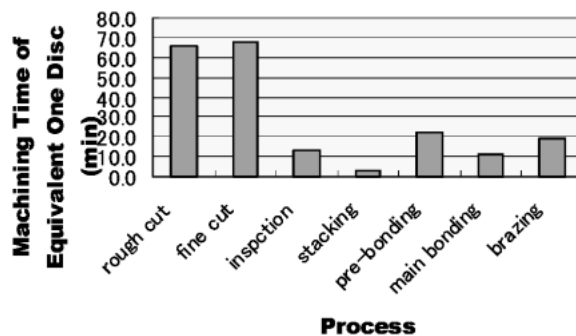


図3 ディスク一枚当たり工程時間

る。

また仕上げ工程では加工速度の向上、チャックの芯出し精度、芯出し高能率化、ワーク把持特性向上などから、従来3,800 r.p.m.であった加工速度向上のために新規開発の6,000 r.p.m.スピンドル^{*7)}付き超精密旋盤を導入し、高エネ研シーズのピエゾによる芯出しの自動化技術をIHIとの共同研究で完成し¹⁸⁾、岡山県都市エリヤ産学官連携促進事業の一環として岡山県工業技術センターと安田工業^株によるワンチャック両面加工スピンドル^{*8)}の開発¹⁹⁾などが実施された。芯出しについては、高富俊和は簡単な治具を用いた手作業で30秒で0.3 μ mの芯を出すのが、試作依頼先や共同研究先では慣れないと半日経っても芯が出ないという例さえあった。このように芯出し自動化の研究は将来の量産を考えるとぜひとも完成させなければならない課題であった。さらに接合面粗さを指定のRy 0.050Sより粗くしても接合強度と真空タイトを確保できる拡散接合の可能性については新潟大学大橋 修との共同開発研究で追求した²⁰⁾。

次に1枚当たり時間の長い仮接合(実時間48時間)や本接合(実時間24時間)の時間短縮化も課題としてクローズアップしてくるが、仮接合については^株加藤製作所との共同研究でレーザーによる直接接合と置き

*6 回転工具位置を変えて固定した工作物を加工する方法。ここではHOM穴などの角(かど)の稜線を凹の丸みのついた回転工具でなぞって滑らかな面を取る工程。なお、回転する工作物に対して位置を変えられる刃物台に固定した工具を当てて切削する工作機械が旋盤である。

*7 一般に回転軸。ここでは工作物をチャックして回転させる軸。超精密空気軸受で保持される。

*8 中空モータの中心部に中空チャック付きのスピンドルを配置してこれを回転させ、両面から加工する機能を持つ新しい構想の旋盤。

ロウ溶解接合法^{*9}の開発²¹⁾により 20 分以下で仮接合可能となるデータが得られた。本接合については諏訪熱工業^株との銅材としては初めての試みとなったパルス通電拡散接合法^{*10}を研究し、60 枚のディスクを 8 時間程度で接合可能なことを示した。さらに変形などの評価は未了であるものの強制冷却で 3 時間まで時間短縮可能なことが確認された²²⁾。

また検査工程も短縮が必要であるが、HOM 穴周りの R 面取りの曲線の繋がり角度を形状測定器結果から算出するソフト開発²³⁾などが工程改良に有効に機能した。

ロードマップを鑑に計画運営をしていくということを行行動指針とすると、上の事例でも示したように課題の重要性判断がしやすくなると思われる。また日常の研究についてもマイルストーンの達成状況で研究結果を評価することができ、必要なときに必要な手を打つという運営が可能となるはずである。

6. 仕様の明確化と図面の充実

6.1 仕様書

加速器研究者が詳細に作った加速器としての性能表があるが、これを機械工学の言葉に直した仕様書を作成することが必要である。筆者の 6 年の経験では多くの仕様書や図面を支給されたり作成したりしたが、この内容が十分でなかったと思われる。すなわち、加速器は製造という機械工業のプロセスを通らなければならぬので、機械部品、機械装置としての仕様作りに機械工学研究者をもっと参画させるべきであったと考える。寸法や公差、粗さなどの形の上の仕様だけでなく、洗浄や表面処理、単品や組立後の性能、加工上の留意事項、搬送方法と留意事項など加速器研究者の要求に対して「ものづくり」担当者としていかに実現するかを定量的に記載した仕様書が必要なのである。このようなまとまった仕様がないと仮りに別資料で記載してあったとしても、人により理解にバラツキが出ることとなるので、この仕様書は一表あるいは一冊のビジュアルなものであることが重要である。

6.2 課題の抽出と優先度

5. とも関係するが仕様書の要求する各項目について

^{*9} 複数のディスクの接合面の数カ所に設けた凹部にロウ材を置いてレーザーで溶解してディスク同士を接合する仮接合方式。

^{*10} 接合するディスク同士を軸方向推力で固定し両端にパルス電流をかけ、その通電衝撃で微細接合点において発熱させ、これにより微少な溶融接合をさせ、その後加えた熱により拡散接合を進行させる工法。

すでに実現されている技術、未だ実現できていない技術を精査していくと、機械屋言葉で記載してあっても加速器研究者の研究課題として持ち上げるべきものと、機械工学の立場で処理すべき研究課題、処理事項が分離されてくるはずである。

この課題の中にも加速器の実現に影響する重要なもの、早めに処理しておかないと将来的には問題が大きくなる可能性のあるものなどの優先度が見えてくる。さらに自分達でなすべきものあるいは外部の研究者や企業の力を借りるべきものなどに分離されてくるはずである。

このプロセスについて、筆者は機械工学の立場での課題検討を不徹底ながらも実施をしてきたつもりであるが、加速器研究者との合意が不十分であったものと思われる。例えば、機械工学研究者内の研究課題の振り分けをして相談したとしても、加速器研究者は仮に不満があっても、最終的には機械工学分野については機械屋にお任せするという立場でつこんだ議論にはならなかったように思う。確かに、このフェーズでは学問の自由がまだ優先するところがあるかもしれないが、ロードマップから見て人的、資金的な資源を有効に目的に収斂させるためには、加速器研究者がサポート部署に対して厳しく要求し、サポート部署もこれを柔軟に受けることを努力し、かつその姿勢を示すべきであったと思われる。

6.3 機械屋の言葉としての図面

加速管の研究は相当程度までシミュレーションで性能が予測できるため、1 μm 単位の寸法公差まで計算で押さえられることに大変驚いたものである。事実 DDS 型では外径や厚さの公差が $\pm 1 \mu\text{m}$ となっており、一般的な量産感覚では驚異的なものであった。以降の図面に関することは加速器研究者への要望というより、サポート部署の機械工学研究者・技術者として常に意識すべき問題といえる。

ただし、仕様書をそのまま企業に丸投げして研究の事足りりという研究プロセスを取るなら、詳細な図面作成の問題は何もない。高エネ研の研究スタンスは丸投げせず、加速器研究者が納得できる成果を得てから企業に発注し、技術も移転するというようになっていくからこの問題が発生するのである。しかし、現実には言うは易く、行うは難しであり、その体制は十分とは言えない状況であった。

1998 年の DDS 加速管に続いて、1999 年にはアイリス部断面が楕円形状の RDDS 型ディスクによる 180 cm 管を試作することになり、その先行試作を高エネ研で実施した。

このタイプは超精密旋盤での仕上げ加工に移る前に HOM 穴やこれとキャピティをつなぐスリットなどのフライス盤による加工を含めた粗加工工程を従来のように民間の中小の企業に委託しておこなうこととした。

従来、工作センターが一般的な加工を依頼してきた企業に加工を委託して見ると厳しい公差をクリアできる企業がほとんどなく、可能であっても試作費が非常に高く、しかも計測装置がないため工作センターが精度確認しなければならないというような状況であった。

依頼する側としても、前工程とはいえ HOM 穴などは精密加工レベルなので、その工程の図面による指示が当然なされるべきところ、企業では考えられないことであるが、高エネ研の従来のやり方は仕上げ図にメモを付ける程度がほとんどであったことが判った。さらに外径など代表的な寸法を除いて、図面寸法ほとんど全ては測定せずに受領していたのである。

前工程の粗加工用の図面を作成し必要な公差を明示し、当然ながらこの工程のための部品番号を設定し、性能設計の加速器研究者および機械設計の機械工学研究者・技術者のサインを入れて発行した。この考えはその後の図面に反映させたことは言うまでもない。

また工作センターでも受け入れ検査を実施することにし、加速器研究施設が所有していた 3 次元測定器の管理を工作センターに移すなどして受け入れ検査体制を構築した。超精密加工後のアイリス部の形状測定に供したりしたが、同様な測定器でその部分の形状不良を指摘した SLAC からのフィードバックにも対応できた。計測器を所有することは、どうしても加工原価を押し上げてしまうが、加工と測定は一体でなければならない。RDDS 以降の前加工はその条件を備えた榊森川製作所で実施するようにし、原価低減についても数回の討議を重ねた²⁴⁾。

機械屋にとっては図面は命令書であるため、工程毎に図面を作る程度の厳密さがないと、完成品の品質が保証されず、また再現性の確保などができなくなり、特に問題が発生したときの原因究明ができなくなってしまふ。

このような意識で運営していたつもりであったが、これらの技術を民間企業に技術移転をするときには研究者や技術者を移転先に何度も送り込まねばならなかったり、メーカーで再度技術開発を繰り返すということもあった。これは図面が単なる寸法のみのものであったなどノウハウが記載されていないまだ不備なものであったことと、加工してみても良いものができることと安心して図面に記載することをせずに、一品料理の職人芸の

域を出られなかったという工作センターの行動にも起因していたものと思われる。

加速器研究者は、ぜひ機械研究者の研究結果を本当に「技術」になっているかの目で厳しく評価することを期待する。

7. 担当者の責任ある研究遂行

2003 年の時点で GLC で設定されたような 2006 年に結論を出せというような非常に短期間にゴールという日程が出た時点では、より優先度を意識した研究に転ずる必要があると思われる。

研究者にとってはどちらかというやらねばならぬことよりも、自分の研究として興味があるものに目が行ってしまったり、やれることを選んでしまう傾向は否定できない。これは基礎研究フェーズでは許されても、ゴールが近い開発研究フェーズではぜひ避けたいことであり、ロードマップ重視の研究課題選びに変更せざるを得ないであろう。それまでのような進め方ではゴールの実現は困難であると言わざるを得ない。

このようなゴールを忘れた行動が見えるのは、従来ロードマップが明示されなかったこと、課題と道筋に対する議論が不足したこと、かつそれが合意共有がなされなかったということも要因の一部であるので、これらのプロセスを意識して解決を図ることを期待する。

8. ネットワークの重要性

8.1 ネットワークによる研究促進と情報の共有

これは加速器研究者のネットワークと合わせて機械工学分野のネットワークも重要である。2003 年度より設置されている LC 研究会などはまさに双方に跨った機能のものとして聞いている。

筆者も特に機械工学分野の成果が「ものづくり」ということに追われて記録されないまま放置されている状況であったので、前年の開発研究の状況を毎年報告し、記録していく機能も含めて、次の研究指針を得るためにワークショップをおこなうこととした。

2000 年 4 月 21 日に高エネ研メカ・ワークショップを開催し、加速器研究者も参加し、研究のねらい、動向などから加速器自体の研究状況の報告を願い、全体の流れと背景の理解を図った。機械工学分野の独自の研究、他大学や企業との共同研究、開発業務、試作担当会社の試作状況、実際の加工や測定作業内容などの報告と討議もおこなった。その後毎年 4 月に開催を続け、筆者の退官後も後任の機械工学センター長の上野健治教授がさらに幅広く多くの参加者が集うワー

クショップに育て上げてくれている。

8.2 外部研究資源の活用としての共同研究

1998年からは共同開発研究などのかたちで他大学の研究者との共同研究を機械工学分野でも開始した。東北大学清野慧教授、高偉助教授との長いトンネルの中での加速管のアラインメント測定研究²⁵⁾、大阪大学島田尚助教授とのダイヤモンド切削時の工具寿命の延長に関する研究²⁶⁾、新潟大学大橋修とのXバンドディスクの接合法として確定した拡散接合の迅速化、低温化²⁷⁾などの将来課題を最初の共同開発研究テーマとした。これらは工作センターの研究課題であるものの、目の前の加速管の加工や性能向上などの研究課題にどうしても人的資源が割かれてしまうので、その分野の専門家である機械工学研究者に仲間になってもらい将来課題の研究を先行するという重要な意味を持っていた。この共同開発研究は研究内容や研究者を変えながら引き続きおこなわれていることは言うまでもない。

9. おわりに

本稿をまとめる契機は編集委員会より機械屋として加速器研究者に対しての意見をまとめて見よという課題を頂戴したことによる。そこでXバンド加速管の研究プロジェクトのメンバーとして研究および研究支援をしてきた中で少し違和感あるいは気になると感じていたことについて考えてみた。その結果、どうもロードマップが末端まで徹底されず、そのプランに沿って、それぞれの構成チームが策定したサブプラン、およびその改訂版をその都度プロジェクト内で共有してこなかったところに要因があったのではないかという結論となったので若干経験などを交えながらまとめて見た。

実際に研究を共にしているときに、この結論を明確に意識できていれば、またそれを実行に移していればサポート部門としての支援業務や機械工学研究を遂行する上で、もう少し役立つことができたであろうと残念に思っている次第である。

なお、筆者が関係した業務や研究者達はかなり限られた範囲であったのと、筆者の見方が量産製品の開発研究の経験しかないという立場からの限定的なものであるため、誤解や独りよがりのところが多々あると思われるが寛恕願いたい。

この場を借りて、一緒に研究をさせていただいた高エネ研の高田耕治名誉教授を始めXバンド加速器関連の多数の研究者、関係した企業の方々、現高エネ研機械工学センター職員諸氏から多くの研究上の支援を

戴いたこと、ならびに現在の職場の科学技術振興機構研究成果活用プラザ宮城の同僚諸氏からこの稿をまとめるに当たっての沢山のヒントをいただいたことに対し深く感謝の意を表明いたしたい。

参考文献

- 1) ACFA-Asian Committee for Future Accelerators et al., KEK Report 2003-7 (Sept. 2003) A/H.
- 2) 佐藤 勇, 加速器, Vol. 2-no. 2 (2005), 129.
- 3) 佐藤 勇, 加速器, Vol. 2-no. 2 (2005), 127.
- 4) T. Higo et al., KEK Preprint 95-22, May (1995).
- 5) Y. Higashi et al., KEK Report 2002-2 (April 2000) A/H, 8.
- 6) Y. Higashi et al., KEK Report 2002-2 (April 2000) A/H, 21.
- 7) International Study Group, KEK Report 200-7 (April 2000) A.
- 8) ACFA-Asian Committee for Future Accelerators et al., KEK Report 2003-7 (Sept. 2003) A/H, 71.
- 9) 根崎孝二, KEK Proceedings 2000-10 (Jun. 2000), A, 85.
- 10) 東保男他, KEK Proceedings 2002-10 (July 2002), A, 187.
- 11) Y. Higashi et al., KEK Proceedings 2003-9 (Oct. 2003), A, 341.
- 12) 樋口誠宏他, KEK Proceedings 2002-10 (July 2002), A, 97.
- 13) 肥後寿泰, KEK Proceedings 2000-10 (Jun. 2000), A, 23.
- 14) 高富俊和他, 1999年度精密工学会秋季大会論文集C23 (1999-9), 106.
- 15) ACFA-Asian Committee for Future Accelerators et al., KEK Report 2003-7 (Sept. 2003) A/H, 21.
- 16) 峠 暢一, KEK Proceedings 2002-10 (July 2002), A, 35.
- 17) 人見宣輝, KEK Proceedings 2002-10 (July 2002), A, 61.
- 18) 飯田勝則他, KEK Proceedings 2003-9 (Oct. 2003), A, 125.
- 19) 横溝精一他, KEK Proceedings 2004-10 (Nov. 2004), A, 107.
- 20) 大橋修他, KEK Proceedings 2004-10 (Nov. 2004), A, 131.
- 21) 石川茂他, KEK Proceedings 2004-10 (Nov. 2004), A, 144.
- 22) 石川政幸他, 溶接学会論文集, 23巻2号(平成17年5月), 344.
- 23) 久米達哉他, KEK Proceedings 2003-9 (Oct. 2003), A, 180.
- 24) 森川孝行他, KEK Proceedings 2004-10 (Nov. 2004), A, 88.
- 25) 横山潤他, 2000年度精密工学会春季大会講演論文集M00 (2000-3), 579.
- 26) 島田尚一, KEK Proceedings 2000-10 (Jun. 2000), A, 71.
- 27) A. Wang et al., Trans. of the Materials Research Society of Japan, Vol. 27, 2002.