

## 光を安全に取り出す (後編)

高橋 直 助高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1  
E-mail: takahasi@spring8.or.jp

宮内洋司 高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1  
E-mail: hiroshi.miyauchi@kek.jp

### 1. はじめに

前編の遮蔽, インターロックに引き続き, 今回はユーザーの皆さんが「人的保護」は勿論のこと, 「機器保護」の観点からも安全に実験を行うために必要な機器がずらりと並ぶ「フロントエンド」を取り上げます。

多くのユーザーにとって, 今回紹介するフロントエンドは通常眼にする機会がないため, その存在すら感じずに実験が進んでいくことが大半だと思います。しかし, ユーザーが実験ホールに放射光を導くために操作するMBS (Main Beam Shutter) や, 放射光の軸芯の部分だけを切り出すマスクやスリットなどは, ユーザーにとって身近で不可欠なフロントエンド機器の一例です。そこで本稿では, ユーザーが安全かつ安定に実験を行ううえで, フロントエンドがいかに重要な役割を担っているかについて, 特にフロントエンドが重要性を持つ挿入光源用ビームラインを念頭において解説していきます。

### 2. フロントエンドとは

フロントエンドという名前はビームラインの先端 (Front End) 部に位置することから命名されたものですが, 特に分岐ビームラインより上流側に位置する「根幹」という意味から基幹チャンネルとも呼ばれます。蓄積リングに直結しているため, ほとんどの構成機器が遮蔽壁内にあり, ユーザーからは縁遠い存在になっていますが, その使命を簡潔に述べると, 「放射光に空間的制限を加え, 光軸近傍のユーザーの欲する良質な光だけを切り出し, 安全かつ安定に光学系に供給する」ということになります。

このことを視覚的に理解してもらえるように, 次の二つの図を用意しました。これらは, SPring-8/BL15XUのリポルバー型挿入光源<sup>1)</sup>を円偏光モード, ミニマムギャップで使用した時の基本波のフラックス密度 (Fig. 1a) と, 放射パワー密度 (Fig. 1b) (第5章に詳述) の空間分布をそれぞれ示したものです。この光源は特殊なため多くのユーザーに馴染みのない空間分布形状をしています, フロントエンドの説明をするのに好適であることから用いていま

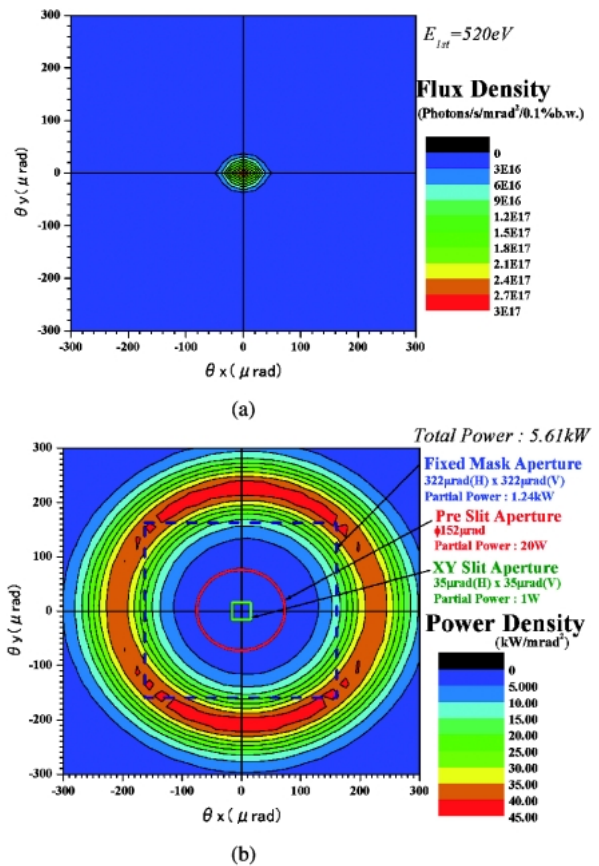


Fig. 1 Spatial distributions of the 1st harmonic flux density (1a; Upper) and the power density (1b; Lower) in the helical operation mode at SPring-8/BL15XU.

す。ユーザーの関心事はもちろん特定のエネルギーの光であり, まさに Fig. 1a が「光軸近傍のユーザーの欲する良質な光」の分布です。挿入光源のギャップを操作して, こういう「自分の使いたい基本波だけを含んでいる光」だけが放射されて, MBS という蛇口をひねる (開ける) とそのまま出れば何の問題も無いのですが, 残念ながらそうはいきません。高次光が含まれている<sup>2)</sup>からです。この高次光も含めて放射された全光子のフラックス密度をエネルギーで積分した分布が Fig. 1b です。パワーという観点か

ら見ると、このように大きな光が来ているのです。この図だけを見ると、軸外の上下に見える赤い部分が最も役に立ちそうに見えますが、これを実験ホールにまで取り出してしまうと、実際には必要としない高次光が光学系に紛れ込むばかりでなく、光学素子に理不尽な(基本波だけを使いたいユーザにとって「割にあわない」)熱負荷を与えることとなります。そこでフロントエンドの出番です。これら不必要な軸外の放射光のパワーをマスク、スリットといった機器で効率よく吸収し熱に変えて除去するのです。この場合、光源からのトータルパワー (Fig. 1b の全面積の積分値) が5.6 kW であるのに対し、フロントエンドに設置されているXY スリットの開口サイズを $\phi 1\text{ mm}$  ( $\phi 35\ \mu\text{rad}$ ) とすると、光学系に導かれるパーシャルパワー (Fig. 1b の緑色で囲われた部分の積分値) はわずか1 W となります。

### 3. フロントエンドの構成機器と役割

例えば SPring-8 では Fig. 2 に示すように、フロントエンドの領域を、蓄積リングの光取り出しポート終端から遮蔽壁直下流のベリリウム窓までの部分と定義しています。このようにフロントエンドの機器のほとんどは、通常立ち入ることができない遮蔽壁内に設置されているため、信頼性を高めることが重要です。前編でも触れられているように、フロントエンドでの機器故障は、全ユーザの実験を長時間に渡って止めてしまう場合が多いからです。さらにビームアポートに至らなくても、駆動機器が動かないといった事態に陥ると、特定のビームラインで実験ができなくなります。こうした事態を避けるため、できるだけ確立した技術を使い、普段の保守点検作業をきめ細かに行うこと

が重要であるのは言うまでもありませんが、特に放射線対策がキーポイントとなります。例えば、ケーブルの被覆部には架橋ポリエチレンを、電磁弁、ネジ継手部等のシールやパッキング材にはテフロン系(フッ素含有系)を排除した耐放射線性に優れた材質のものを選定します。それでも蓄積リングを含め、アブソーバやフィルター等の散乱体の近傍では局所的に線量が高くなるため、鉛板による局所遮蔽で対応しなければならない場合があります。

#### 3.1 ビーム成形と高熱負荷処理

軸外の放射光成分を除去し、光軸中心の光だけを取り出していく様子をとらえた画像が Fig. 2 の下に示してあります。これは、ビームラインのコミッショニング(初めてビームラインに放射光を導入し機器の調整を行うこと)の際に、スクリーンモニター(SCM)で放射光位置を確認した時のものです。SCMにはアルミナ蛍光板が光軸に対して $45^\circ$ 傾けて取り付けられています。まずSCM1では、挿入光源からの放射を真ん中にして、左側に挿入光源の直下流の、右側に直上流の偏向電磁石からの漏洩光が見えます。これが開口サイズ $\phi 7\text{ mm}$ 程度の固定マスクを抜けることでSCM2のように四角いビーム形状になり、その後前置スリット<sup>3)</sup>で $\phi 4\text{ mm}$ 、最終的にはXYスリット<sup>4)</sup>で $\phi 1\text{ mm}$ の空間的制限を受けてSCM4に写っているような状態で光学系に導かれるのです。蓄積電流が100 mA 時の各位置での放射パワーも機器配置図中に示しました。このように軸外の不要なパワーを取り除くためにビーム加工を行う機器を高熱負荷機器と呼び、その技術については第5章で詳しく述べます。

「こんなに小さくしたら使いたいエネルギーの光が弱く

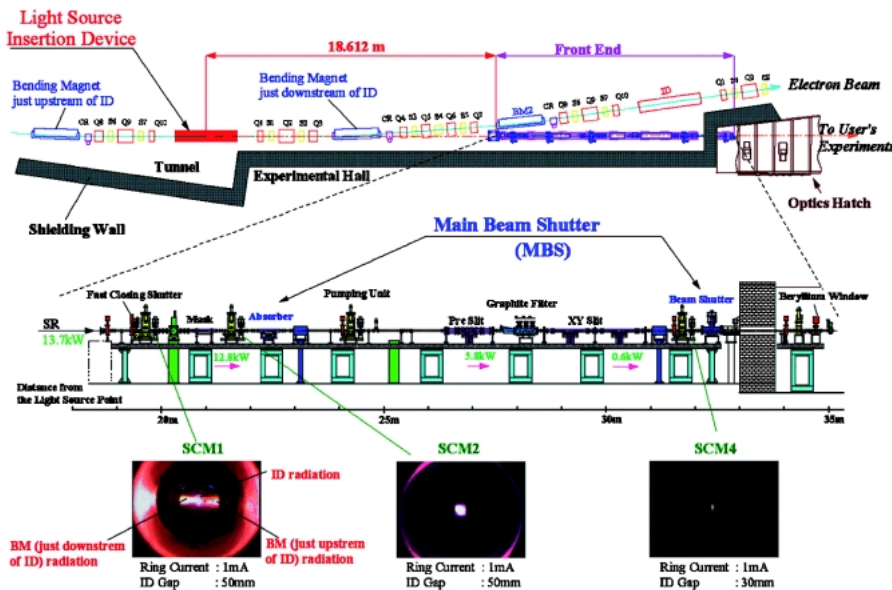


Fig. 2 Schematic view of the storage ring and front end in the SPring-8 tunnel. The detailed arrangement of the front end components and the images of screen monitors obtained during a beamline commissioning at BL12XU are also shown.

になってしまうのでは？」と未だ心配されるユーザは、是非、前特別企画（放射光源シリーズ）の第10回<sup>2)</sup>を読んで下さい。高熱負荷機器が基本波のフラックスを損なうことなく軸外の不要な放射パワーを取り除いていること、そしてXYスリットの開口サイズを拡げればいくらかでもフラックスが増えるという事実はあり得ないこと、が平易に解説されています。

### 3.2 放射光の導入/遮断

全てのユーザが操作する機会を持つフロントエンド機器の代表が、放射光の実験ホールへの導入/遮断を司る“ビーム遮断関連機器”です。各施設によってその名称がまちまちで混同されがちですが、SPRING-8とKEK-PFでは、放射光の熱成分および放射線成分を遮断する機器を各々アブソーバ<sup>5)</sup>、ビームシャッターと呼んでいます。実は、ユーザが操作しているMBSとは、この二つの機器を併せた総称であり、両者はユーザからの「開」「閉」指令により連動した制御を受けます。

ビームシャッターは、放射線を遮蔽するために十分な厚さを持ったヘビイメタル（タングステンを主成分とした合金の商標）、もしくはステンレスのブロックが内蔵されていて、これを圧空駆動シリンダーで上下させます。光学ハッチ内の放射線遮蔽体であるDSS (Down Stream Shutter)には鉛ブロックが使用されていますが、鉛は超高真空に適さない材料であるためフロントエンドでは使用できません。具体的な放射線遮蔽ブロックの厚さは、SPRING-8ではヘビイメタル400 mm、KEK-PFではヘビイメタル250 mmもしくはステンレス400 mmです。

この遮蔽ブロックに放射光が直接照射されると融けてしまうため、その上流側に熱成分を吸収するための機器が必要になります。この役目を担う機器がアブソーバであり、水冷銅ブロックが圧空駆動シリンダーで上下する機構になっています。アブソーバは、MBS閉時に放射光を全て受け止める必要があるため、最も過酷な高熱負荷機器（第5章に詳述）と言えます。アブソーバとビームシャッターの連動のシーケンスは、上述のように遮蔽ブロックが熱融解することを避けるために、MBSを開ける際にはビームシャッターを開いた後にアブソーバを開、MBSを閉じる際にはアブソーバを閉じた後にビームシャッターを閉じる動作となります。

MBSの開閉要求指示は、KEK-PFでもSPRING-8でも基本的にはユーザが手動で行うスタイルですが、最近SPRING-8で実験用PCからの自動開閉が可能になり、こういったユーザフレンドリーな流れは他施設にも波及するものと思います。このような変化を踏まえ、その使用に対し留意してほしいことがあります。それは、もしMBSの下流にあるBBS (Branch Beam Shutter)やDSSの開閉で代用できるならばMBSの無用な開閉を避けてほしい、ということです。MBSのような駆動装置には有限の寿命回

数があり、そして開閉回数が多ければそれだけ故障率も増加します。普段立ち入れない遮蔽壁内の機器の故障と、MBSが閉の状態であればいつでも修理・交換できる実験ホールの機器の故障とでは、その深刻さに大きな違いがあることをご理解下さい。

### 3.3 超高真空の維持

蓄積リングでは、残留気体と電子ビームとの衝突によるビーム寿命の低下と制動放射線の発生を極力避けるために、超高真空の維持が必須です。従って、窓無しで蓄積リングに直結しているフロントエンドにも同等の超高真空が要求されます。またVUV-SXビームラインでは、残留気体の吸収・散乱による放射光強度の損失を抑制する意味からも超高真空が必要となります。そのためフロントエンド真空系はベーキング可能な仕様となっており、さらに各機器のメンテナンスを容易にするためにゲートバルブによっていくつかの真空セクションに分けられています。フロントエンドに使用するゲートバルブは、耐放射線性に優れ長期間真空封止能力が維持できるオールメタル製を採用することが望ましく、SPRING-8ではすべてオールメタル製となっています。しかしオールメタル製は非常に高価であるため、KEK-PFでは高い信頼性が要求される蓄積リングとの取合部以外のゲートバルブについては比較的安価なバイトンシール製を採用しています。バイトンシール製は、耐放射線性がかなり劣るため、シール面に鉛で局所遮蔽を施すことでバルブの寿命を延ばす工夫をしています。フロントエンドの各真空セクションには、超高真空を維持するためのイオンポンプ、チタンゲッターポンプといった溜め込み式ポンプや、真空監視のための電離真空計が設置されています。ターボ分子ポンプなどの移送式ポンプは、真空立ち上げ時に一時的には使われますが、遮蔽壁内は異常有無の監視、故障や事故への迅速な対応が困難であるため主排気ポンプとしては使用されません。

蓄積リングの真空保護という視点からのフロントエンドの仕組みは二つあり、急激な真空悪化と、比較的緩慢な真空悪化への対応に分けられます。この方針はどの施設でも同じですが、機器構成の違いなどからその具体的対処については様々なようです。まず前者についてKEK-PFで採用されていたシステムは、高速シャッターシステムFCS (Fast Closing Shutter)と衝撃波遅延管ADL (Acoustic Delay Line)との組み合わせによるものです。FCSは、フロントエンドに設置されたトリガー用真空計が急激な真空悪化を検知すると即座（10ミリ秒程度）に高速閉止ブレードを動作させ、衝撃波を阻止するシステムです。またFCSは高速動作を行うように特化されているため水冷が不可能であり、同時にビームアポートするシステムが必要になります。さらに、ゲートバルブのような真空気密性がないことから、連動してゲートバルブを閉めるロジックも求められます。

一方、ADLは数メートル長の丸型真空パイプ内部に放射光が通過するサイズの穴が開けられた多数のステンレス板が取付けられた構造で、特にフロントエンドより下流の突発的な真空悪化に伴う衝撃波の速度を遅くするものです。しかし近年では、ADLを使わずに、フロントエンドの真空パイプの断面を放射光が通過するのに必要最小限まで小さくすることが多くなっています。これは、コンダクタンスが小さくなり差動排気と同じ効果を生み出すと同時に、建設費低減、小口径フランジ採用による真空漏れ不具合発生機会の減少等の効果が大きいからです。

比較的緩慢な真空悪化への対応については、圧力監視用真空計のセットポイントをトリガーとし、真空悪化セクションの場所に依りて、アプソーバやゲートバルブを閉じたり、場合によってはビームアポートも要求します。

各ビームラインの真空悪化に対しては、対象のビームラインだけを閉鎖することで他のビームラインのユーザ運転は続行可能ですが、蓄積リング自体の真空度の大幅な悪化はただちに蓄積リング全体の長期運転停止に結びつきます。ユーザの皆さんも真空事故には十分に注意して下さい。

#### 4. ユーザ実験への影響

軸外の熱成分を除去することがフロントエンドの基本的役割であることから考えても、ユーザの実験結果に直接影響を与えるフロントエンド機器は多くありませんが、MBS開の状態で光軸上に位置する機器として、ベリリウム窓とグラファイトフィルターがあることに留意下さい。

ベリリウム窓はまさしく「窓」であり、上流側のリング真空（超高真空）と下流側の光学系真空（高真空）を切り離して遮断する一方、約3 keV以上のエネルギーの硬X線だけは透過させるものです。従って、ベリリウム窓よりも下流側のX線ビームラインでは超高真空が要求されなくなり、取扱いが非常に楽になります。ベリリウム窓の構造は、水冷銅マスクにベリリウム箔（厚さ0.25 mm）を接合したもので、通常2枚1組で設置し、その間を超高真空にしています。この配置は、かつてKEK-PFで下流側のベリリウム窓よりも下流のビームパイプを1気圧ヘリウムガスで満たしてX線を導くようにしていた際、ベリリウム箔が常にヘリウムガス圧による力を受け続けていたこと<sup>6)</sup>、またこのヘリウムガスに混入した空気がベリリウム窓を酸化して損傷し、下流側ベリリウム窓を交換する必要があったこと、から導入された経緯があります。現在では、ベリリウム窓の下流も真空に引かれるようになったのでこのような危険性はなくなりましたが、光学系のメンテナンス時にはベリリウム窓の下流が1気圧になることは同様であり、真空事故を防ぐ意味からも、この設計が踏襲されています。フロントエンドのベリリウム窓は特に大きな冷却能力が要求されるため、KEK-PFでは冷却水路をできるだけ受光面に近づけるためにHIP（熱間等方圧加

工法）を用いた製造工程も取り入れています<sup>7)</sup>。

ベリリウム窓の上流側に設置されているグラファイトフィルター<sup>8)</sup>は、低エネルギー成分をグラファイトに吸収させることでベリリウム窓への熱負荷を低減するためのもので、厚さ0.1 mm程度の数枚のグラファイト箔から構成されています。従って、VUV-SXビームラインには、ベリリウム窓もグラファイトフィルターも設置されません。各々の箔は、水冷銅ブロックに押しつけて冷却する構造が一般的です。かつて使用されていたグラファイト箔は、天然グラファイトを原料にしたものであったため、天然グラファイト中の不純物金属による吸収端吸収が生じる可能性があります。しかし現在では、カプトンフィルムを原材料とした固相・固相法で製造しているので、この不安は解消されました。

特にイメージング、トポグラフィーのユーザから、ビームの均一性の改善要求があり、SPring-8では既存のベリリウム窓を高純度（99.8%以上）・高面粗度（Ra 0.1 μm）型のものに交換しています。しかしこの新型の窓材は、機械的特性試験により強度や靱性が大幅に低下する<sup>9)</sup>ことがわかりました。このため、真空事故を防ぐというフロントエンドの使命から、次章に示す弾塑性解析やオフラインでの10<sup>4</sup>回の繰り返し照射試験を行い、耐久性を確認しました。その結果、ビーム均一性の改善に関する報告<sup>10)</sup>もなされています。ただし、この材料でも母材内部にポイドが存在し、表面研磨だけでは透過強度の一様性が完全には改善されないこともわかってきたため、新たなベリリウム材の選定が必要<sup>11)</sup>であるようです。ユーザ実験の成果向上を最大限に考えながら、新たな材料に対しても機械的特性の把握や解析による評価を行っていくことになります。

#### 5. 高熱負荷処理技術

第三世代放射光施設においては、高熱負荷は何もフロントエンドだけの問題ではなく、光学系にある分光器、ミラー、はたまたユーザの試料にも影響することです。しかし、それぞれ意味合いが違います。フロントエンド機器は、構造的に破損しなければいいのですが、軸外の巨大な熱負荷を処理する必要があります。一方、光学系では降り注ぐ熱負荷量は相対的に低いですが、分光、集光性能を損なわない構造が要求されます。ここでは、パワーへの理解促進の観点から初歩的な解説も含めて、少し専門的になりますがフロントエンド機器にとっての高熱負荷処理技術に絞って話を進めます。

##### 5.1 トータルパワーとパワー密度

パワーの特性を表す量として、トータルパワーとパワー密度の二つがあります。前者は、光源から放射されたトータルフラックスをエネルギーで積分したもので「W」の単位で表され、後者は前に述べたように、単位立体角あた

りに含まれるパワー「W/mrad<sup>2</sup>」として表されます (Fig. 1b はパワー密度の空間分布の例を示した)。いくらトータルパワーが小さくてもビーム発散角が小さければ、パワー密度は大きくなります。高熱負荷処理技術で注目すべきはパワー密度の大きさです。「満員電車で誰かに足を踏まれた時、それがスレンダーな女性であってもピンヒールのかかとで、だったとしたら…」とでも、想像してみてください。

その具体的な大きさは、SPring-8の最も標準的なアンジュレータの場合、トータルパワー13.7 kW、最大パワー密度550 kW/mrad<sup>2</sup>となります。しかしここで重要なことは、パワー密度は、空間分布を持っているということと、具体的に対象となる機器での実効値に直して検討する必要がありますということです。例えば典型的なフロントエンド入口付近 (光源から約20 m) での実効のパワー密度は、軸上で最大となりその値は1.4 kW/mm<sup>2</sup>となります。世界最高輝度を誇る25 m長直線アンジュレータだと最大パワー密度は2 MW/mrad<sup>2</sup>となり、値だけ見ると「パワー密度が4倍にもなりさあ大変だ」ということになるのですが、長直線アンジュレータの場合、発光点からフロントエンドまでの距離が長くなり、フロントエンド入口付近 (光源から約35 m) での実効の最大パワー密度は1.6 kW/mm<sup>2</sup>で、標準型とほぼ同じになります。これもパワーを考える上で重要なことです。

## 5.2 高熱負荷への対処

フロントエンドにおける高熱負荷への対処方法の基本は、Fig. 3に示すような「斜入射技術」を軸としたものです。単位面積あたりの熱負荷量を軽減するために、受光部を光軸に対して傾けて照射面積を増やします。パワーを面内に分散させる (先の満員電車の例に戻ると、ピンヒールをスニーカーに履き替えることに相当) のです。また、冷却面での熱伝達係数を増加させる目的で冷却水路に銅メッシュや銅コイルを挿入することも行われます。銅メッシュの挿入は、年1回の洗浄作業や特殊なロウ付け技術が要求されること、冷却水の圧力損失が大きく機器の面間長が制限されるという問題を抱えているため、世界的に見てもSPring-8で開発された銅コイル技術<sup>12)</sup>が主流になっています。さらに、受光部材質は、一般的な無酸素銅ではなくGlidCopという商標名でお馴染みのアルミナ分散強化銅に代表される先端材料が使われます。GlidCopを使う最大の理由は高温特性に優れているからですが、冷間加工度やロウ付け等の製造工程により機械的特性は少なからず異なるため注意が必要です。これらの技術を組み合わせて実効的なパワー密度を15 W/mm<sup>2</sup>以下に抑えることにより、大雑把に言って光軸方向の面間距離1 mあたり10 kWのパワー処理が可能になっています。SPring-8では最も熱負荷の厳しい機器で0.38度まで傾けています (ビームの受光面積は約150倍に拡大) が、これ以上の傾斜による受光面

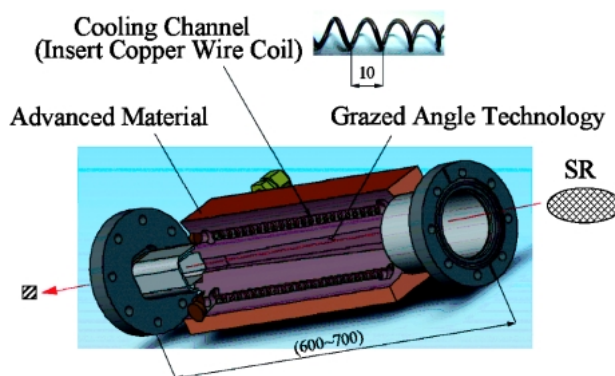


Fig. 3 Typical schematic drawing of a high-heat-load-component using the grazed angle technology.

積の拡大は、加工上の問題や面間長さの制限から限界にきています。

そこで、パワーを面内だけでなく、深さ方向にも分散させる「体積発熱技術」の開発も進められています。従来の受光部材質であるGlidCopでは、放射光はほぼ照射面近傍で吸収されるためパワーが表面に集中します。そこで、ベリリウムのようなX線をあまり吸収しない軽元素を採用し、光を内部にまで進入させ体積で熱を吸収することにより、表面での局所的な温度上昇を抑制しようというものです。この技術を使った体積発熱型マスク<sup>13)</sup>は、面間距離0.2 mで約4 kWのパワーを処理できる設計になっています。

## 5.3 熱および熱応力解析

高熱負荷機器の使用限界を考える際、まず考慮されるべきことは「熱くなりすぎて溶けないこと」であり、最高温度を予測する必要があります。物質に放射光があたると吸収されて熱に変わります。この熱流束は、物質内部において高温側 (照射部) から低温側 (非照射部) へ、冷却面において物質表面から周囲流体へ移動します。前者を「熱伝導」といい、熱流束は熱流の方向の温度勾配に比例します。この比例定数を熱伝導率 (W/m/K) といい、代表的な例として常温では、銅: 385, アルミ: 240, SUS304: 16がおおよその値です。後者は「熱伝達」と呼ばれ、熱流束は物質と流体の界面での温度差に比例します。こちらの比例定数が熱伝達係数 (W/m<sup>2</sup>/K) であり、流体の状態が静止した空気 (積極的に冷却しない) の場合と、冷却水を強制的に流した場合など、状況によって大きく異なります<sup>14)</sup>。従って、簡単な一次元、二次元モデルとして扱えるような形状 (例えば角柱のような単純で軸対称な形) の受光体については、熱流束、熱伝導率、熱伝達係数を境界条件として与えれば、周囲流体の雰囲気温度と機器の最高温度との差が比較的容易に計算され、大雑把な最高温度を予測することができます。こうした単純モデルでは、厚み方向への熱の拡がりを考慮しませんが、一般的に実際よ

りも高目に計算されるため安全側に働きます。しかし、実際の機器は複雑な三次元構造で、熱流束も空間分布を持っており、さらに熱伝導率や熱伝達係数の温度依存性（非線形性）を考慮する必要もあります。また、受光面が高温になった場合には、伝熱のもう一つの形態である「熱輻射」も影響してきます。このような場合に手計算を行うことは極めて困難であり、通常、有限要素法を用いたコンピュータシミュレーションで温度分布を計算することになります。

それでは、この計算された最高温度が、物質の融点を超えなければ問題ないのでしょうか？ 答えは「否」です。「熱応力」の問題があるからです。熱応力とは、温度変化（勾配）による伸び縮みが拘束されることによって発生する応力で、弾性域では材料のヤング率、線膨張係数、温度差に比例します。機器の中心部に放射光があたり周辺部を冷却するという一般的な構造の場合には、中心部の温度が上昇し伸びようとしますが、周りが冷却されているため伸びが拘束されてしまいます。この時の応力分布は、熱解析で得られた温度分布を境界条件として与えた構造解析により求められ、受光部には圧縮応力が、冷却部には引張応力が発生します。この応力状態を材料の機械的強度特性と比較することで静的（放射光が照射された定常状態）な挙動がつかめます。

しかし、これでも十分とは言えず、熱負荷の繰り返しによる疲労に対する評価が求められます。疲労とは、繰り返し応力が負荷されることにより、比較的小さな応力状態でも（降伏点より十分に小さくても）亀裂が発生し、破壊に至る現象のことです。今回のケースでは、放射光の照射が止まると受光部温度は下がり応力状態が圧縮から引張へと変わり、この加熱冷却による熱応力の変化がMBSの開閉、IDギャップの変更、加速器の運転/停止等によって繰り返し負荷されることにより熱疲労の問題となって現れるのです。

#### 5.4 今後の見通し

従来、高熱負荷機器の設計基準として、「静的な応力分布を弾性解析で求め、最大相当応力が材料の降伏点以下であること」が一般的に用いられていました。塑性変形は破壊の一步と考え、弾性変形内での使用に限っていたのです。しかし、更なる光源の高出力化に対応するにあたり、この基準は保守的であり、判断基準を見直そうという動きがあります。つまり最高温度の部分が局所的に降伏したとしても、欠陥等が無く発生する応力が破断応力以下であれば、一回の照射で壊れることはないからです。このように、塑性変形域での使用も視野に入れるとなると、まず弾塑性解析による応力一歪み線図の取得が必須になりますが、その遂行には多大な時間と労力がかかっていました。しかし、最近のコンピュータの高性能化により処理速度は格段に速くなり、モデル化の工夫次第で実用的な検討が可

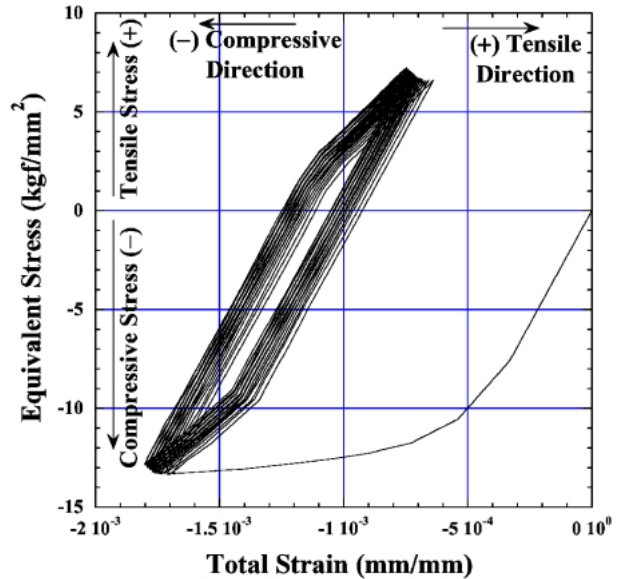


Fig. 4 The solutions on the elastic and plastic analysis, which is the cyclic diagram of the equivalent stress and the equivalent plastic strain, in case of a beryllium window for undulator beamlines at SPring-8. They are marked +/- sign based on the analysis results.

能な域に入って来たと言えます。Fig. 4は、SPring-8の新型ベリリウム窓に対して行った弾塑性解析から得られた応力一歪み線図であり、この結果から寿命の推定<sup>9)</sup>も行われています。

最後に次世代の放射光源に対する高熱負荷機器の展望について簡単にふれます。まだ光源の仕様が明確になっていませんが、X線自由電子レーザー<sup>15)</sup>に代表される、極短パルス的であり、かつ角度発散が極めて小さな放射を想定すると、従来の平均パワーへの対処に加えてピークパワーへの考慮がなされなければならないように思います。すなわち、数十フェムト秒程度の間、現状よりも桁違い（ $10^7 \sim 10^8$ 程度）に大きなピークパワー密度を持った放射光が繰り返し照射されたときの「熱衝撃」が材料に与える影響は未知の領域であり、材料学的なアプローチも含めた取り組みが必要になるのではないのでしょうか。

## 6. おわりに

フロントエンドは何もSPring-8やPhoton Factoryにしかない特別なものではなく、放射光施設であるなら（機器の規模の差こそあれ）どこにでも存在し、重要な役割を担っていることを述べてきました。また、フロントエンドには、この他に「光位置のモニタリング」という重要な役割があるのですが、残念ながら紙面の制約上今回の解説から割愛しました。他のモニターも含めたビーム位置検出技術として、別の機会に詳述されることを期待します。

---

## お願い

本シリーズでは、初心者ユーザが陥りやすい誤りやビームライン担当者の貴重な経験談を募集しています。最終回で紹介する予定です。また、本シリーズに関してご意見・ご要望などがありましたら、合わせて編集担当 (SPRING-8 JASRI 大橋治彦/hohashi@spring8.or.jp, KEK-PF 平野馨一/keiichi.hirano@kek.jp) までお寄せください。

---

## 参考文献

- 1) T. Hara, T. Tanaka, T. Seike, T. Bizen, X. Marechal, A. Nisawa, S. Fukushima, H. Yoshikawa and H. Kitamura: NIM A 467-468, 161-164 (2001).
- 2) 田中隆次: 放射光 Vol. 17, No. 5, 298-302 (2004).
- 3) S. Takahashi, Y. Sakurai and H. Kitamura: J. Synchrotron Rad. 5, 581-583 (1998).
- 4) M. Oura, Y. Sakurai and H. Kitamura: J. Synchrotron Rad. 5, 606-608 (1998).
- 5) T. Mochizuki, Y. Sakurai, D. Shu, T. Kuzay and H. Kitamura: J. Synchrotron Rad. 5, 1199-1201 (1998).
- 6) S. Sato, T. Koide, Y. Morioka, T. Ishii, H. Sugawara and I. Nagakura: NIM 208, 31-36 (1983).
- 7) 浅岡聖二, 前沢秀樹, 西田精利, 坂本直樹: 真空 第38巻第3号 284-287 (1995).
- 8) S. Sato, S. Asaoka, I. Nagakura and N. Kanaya: Rev. Sci. Instrum. 60, 1965-1968 (1989).
- 9) S. Takahashi, T. Mochizuki and H. Kitamura: MEDSI2004 Proceedings 04-16 (2005).
- 10) M. Yabashi, K. Tamasaku and T. Ishikawa: Phys. Rev. A 69, 023813 (2004).
- 11) S. Goto, M. Yabashi, K. Tamasaku, S. Takahashi and T. Ishikawa: AIP Conference Proceedings 705, 400 (2004).
- 12) T. Takiya, T. Mochizuki and H. Kitamura: SPRING-8 Annual Report 164-166 (1998).
- 13) S. Takahashi, M. Sano, M. Oura and H. Kitamura: AIP Conference Proceedings 705, 328 (2004).
- 14) 例えば, 関信弘編「伝熱工学」(1988年 森北出版)
- 15) 北村英男, 新竹 積, 石川哲也: 放射光 Vol. 16, No. 2. 65-76 (2003).