

■マスタープラン2014 & 放射光光源将来計画討論会報告

東北放射光計画—光源加速器システムの概要—

濱 広幸 (東北大学電子光理学研究センター・大学院理学研究科物理学専攻)

はじめに

2011年3月11日の言葉に尽くせない未曾有の堪え難い災害から、東北地方がこれからどのような将来を創り上げてゆくべきか、私たちは今もなお考えあぐむことがある。もともと東北地方6県には仙台市以外に政令指定都市は存在せず、また、例えば大半の県の平均世帯所得は下位の常連であり、科学研究や文化芸術拠点施設も数少ない。首都圏への人口転入超過が指摘されているが現在も日本人人口重心は岐阜県にあることから、東北の過疎化は深刻さを増していることが直感できる。被災3県の震災前の原状復帰が急務であることは疑いの余地はないが、文化、学術、芸術などの精神的に豊かさを育む地域作りの長期的視点は不可欠である。人が人であるためには単に衣食住が満たされるだけでは足りない。精神的な豊かさと自らが生活する地域に誇りを持つことが必須であるということを忘れてはならない。単純な視点だけで安易な東北の将来、ひいては日本のそれを描いてはならないではないかと考えている。

東日本大震災は図らずも東北および北関東地方が我が国のみならず世界への高付加価値素材や先端材料の供給拠点であることが明らかになったが、衣食住の震災復興ではない東北放射光計画が期待する将来は、日本の近未来創造に直結する科学の振興であるばかりでなく、それに伴って展開しうる人間の知的精神活動の豊かさだと考えている。学術によってそれらの輪郭が明瞭に描かれるものでもなく、また文化興隆を予言できるわけではないが、科学技術における象徴的な研究センターは計画して作ることができ、産業創出とも連動させることができ、人間の精神活動に強く弱くリンクしていくものとする。

SLiT-Jの概要

1. 背景

東北放射光施設は、軟X線領域に特化した3 GeV 光源(SLiT-J: Synchrotron Light in Tohoku, Japan)で、硬X線領域に優れた性能を有する既設のSPring-8と相互に補完する関係にあり、我が国がこの2つの光源を併せ持つことによって、基礎科学と産業技術の融合に顕著な相乗効果を期待する。光源加速器設計の基本的なコンセプトは以下のようなものである。

1) SPring-8と同等の光源性能を低コスト点短期間で

建設

既存の加速器、放射光、分析技術を最大限に集約する。建設コストを300億円以下程度に抑え、建設期間も3年以内をめざす。

2) 水平エミッタンス 1 nmrad程度

少なくともアジア最高輝度の世界最高水準の放射光を提供する。

3) 徹底的省エネ設計

施設全体の消費電力3 MW程度に抑える。

施設内にメガソーラーを設置し、大部分の使用電力を地産地消にする。

近年の放射光源技術の進化は目覚ましい。円形加速器中の非線形ビームダイナミクスの理解は非常に進んでいて、かつてのように「作ってみたらビームが廻らない」ような事態はまずありえない。また国内の加速器構成機器テクノロジーも極めて高いレベルにあり、電磁石磁場やアライメントの精度は極限的な値を究めている。忘れてはならない優れた光源技術は高度なアンジュレータにもある。短周期高強度磁場の真空封しアンジュレータはご存知のように本邦のオリジナルであり、世界中で活躍している。トップアップ運転がポピュラーになり、僅か5 mm程度のギャップで運転される光源リングも既に存在している。完璧で奇麗なトップアップ運転、つまりビーム損失が全くなく蓄積ビームも揺らがない入射はかなり難しいものであるが、10年前とはまったく異なる加速器性能が世界で展開している。放射光輝度は 10^{21} photons/s/mm²/nmrad²/0.1%b.w.まで届こうとしていて、超低エミッタンスラティスも深く研究されて来ている、SPring-8も高輝度化を重ねて、現在は水平エミッタスが3 nmrad以下を実現している。硬X線領域ではSPring-8を凌駕する光源は現れていないが、世界に目を向けると3 GeV程度の軟X線領域に特化した高輝度リングが各国で建設ラッシュにある(図1)。最近では加速器研究者を驚かせた3 GeVクラスのMAX-IVやNSLS-IIがサブナノエミッタンスを目指して建設されている。アジアでも台湾で1.6 nmradのTPSを建造している。これらはあと2年程度で稼働し始めることを考えると、残念ながら日本は遅れを喫したと言わざるを得ない。X線の回折限界を目指すERL計画がKEKで進行しているが、蓄積リングの進化に遅れた感は否めない。ここ2,3年では0.1 nmrad程度の高コヒーレンス光源としてUSR(Ultimate Storage Ring, 究極リング)が話題の中にあり、SPring-8やESRFの次世代計画がこれを目指し

世界の高輝度放射光リング ($\epsilon < 10 \text{nmrad}$)

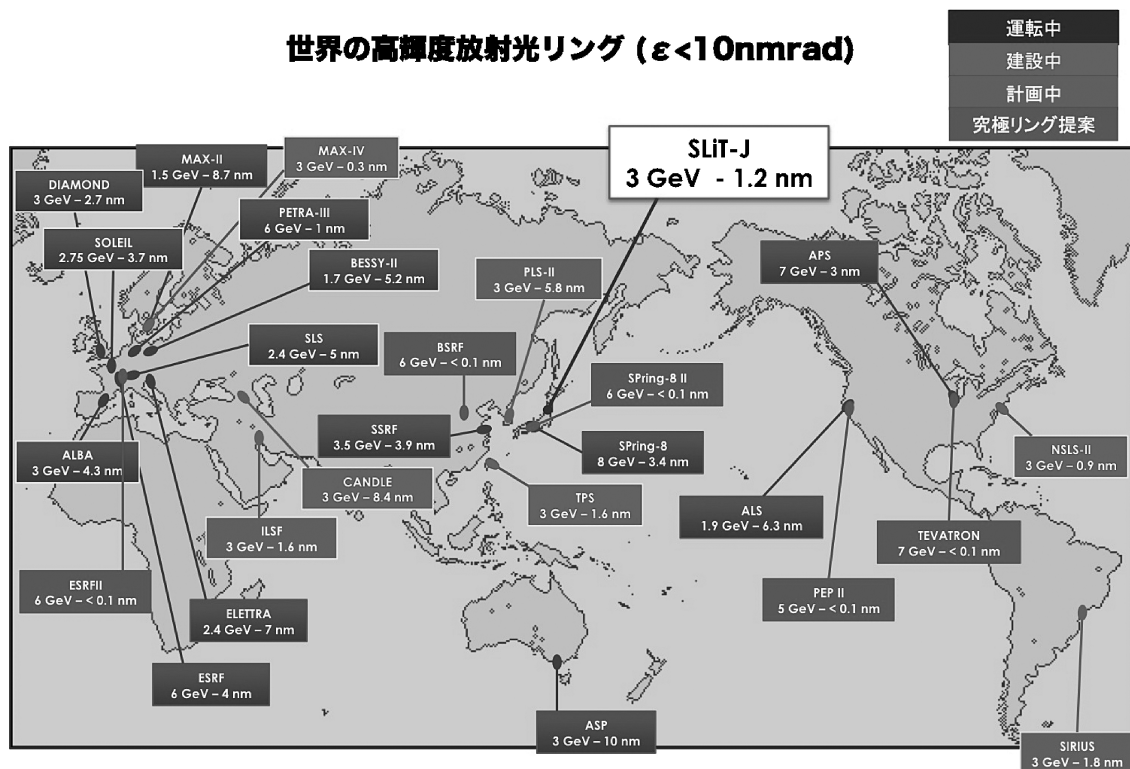


図1 世界の高輝度放射光源施設

ている。アメリカでは高エネルギー物理用のマシンを転用する計画もあり、中国もUSR建設に名乗りを上げている。具体的なMAX-IVやNLS-II計画が知れ渡ったのは2005年頃であるから、今からこれらに追いつくにはまったく容易ではない。

またX線領域の自由電子レーザー(FEL)が大きな話題ではあるが、EUVから軟X線領域においても線形加速器(リナック)ベースのシングルパスFEL計画が世界各国で展開している。国内ではXFELであるSACLAやVUVFELのSCSSが世界をリードしていると言えるが、かといってうかうかしてはられない。今後はシード型FELやECHOなどのアイデアを駆使した高調波FEL技術が増々進展することは疑う余地がない。これらのFELが高輝度放射光リングと併設されることは応用分野の広範な展開が期待できる。本邦オリジナルのCバンド線形リナック技術は継承されて行くべきであり、これをSLiIT-Jの入射器として将来の発展性を確保する事は、東北放射光計画の必須事項ではないかと考えている。入射リナックの建設費用は、ブースターシンクロトロンに比べて安価ではないが、トップアップ運転における消費電力は遙かに少ない。ことに「奇麗な」トップアップ運転を実現する為には、ビームサイズやバンチ長が蓄積リングと同等程度のビーム品質が必要であるため、周長が長いブースターが必要であるため建設経費は膨らむ。例えばTPSは蓄積リング収納室内側の壁にブースターを設置すること

になっており、その周長は蓄積リングとほぼ等しい500 mにもなる。SLSも同様に大型ブースターを用いている。一方、MAX-IVはフルエネルギー入射のための3.4 GeVリナックを建設して先見の明がある。もちろんこれはFELを睨んだ設備でありMAX-II入射器でもこれまでシードFELの基礎研究を行なっている。しかしながら3.4 GeV入射器はコンベンショナルなSバンド加速構造を用いているため、リナック全長は250 mに及ぶ。

2. SLiIT-J蓄積リングのビーム光学

低エミッタンスリングのラティス設計においては、小さな曲げ角の多数の偏向磁石を用いるわけであるが、周長や挿入光源のための直線部の数、あるいは建設経費といった種々の境界条件下で、可能な限りビームの安定性を求めなくてはならない。MAX-IVは、理論最小エミッタンスラティスに極めて近い、7つの偏向磁石で構成するマルチバンドセルを採用してサブナノのエミッタンスに挑戦しているが、常識的な電磁石や真空機器の配置を考えるとセルあたり7偏向磁石は論外に多い。MAX-IIIの頃から開発してきた、セル内のすべての電磁石を一体型の電磁石ヨークで作り上げる手法は極めて独創的である。真似できない(というよりも個人的にはあまり真似たくないと思える)技術あってこそそのラティス設計である。マルチバンドセルは直線部にエネルギー分散を入れない、あるいは入れてもごく僅かに抑える為に必要なセル端部のラティス関数のマ

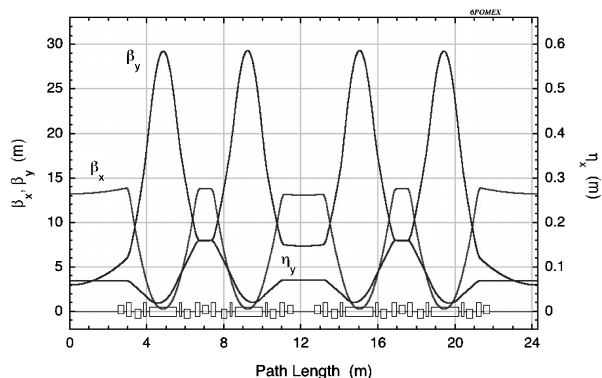


図2 SLiT-Jのラティス関数(最新案)

ッチング部の占める長さが意外に長くなるので、セル内に例えば5個程度の偏向磁石を配するのでは、あまり恩恵がない。またビーム動力学上の非線形性の抑制に用いる6極等の多極磁場を挿入することは必須なので、更に長いセルになる。東北放射光リングは周長が300 m内外を考えているので、無理矢理 MAX-IV のようなマルチバンド理論最小エミッタンスラティスにすると直線部数が10以下になってしまう。ポピュラーなダブルバンドラティスは直線部数を最大限に多くとれることが利点ではあるが、低エミッタンスを追求する為には、直線部に僅かにエネルギー分散を入れるなどの工夫が必要である。また、NSLS-II のように800 m 近くもの周長があればダンピングウィグラーを用いて放射減衰を速めてエミッタンスを更に小さくする方策も有効であろうが、これも東北放射光リングに相応しい手法ではない。

これらの視点を持って、i)挿入光源のために少なくとも12本の5 m 程度の直線部を確保する、ii)複雑なラティス構造は避けながら、1 nmrad 程度の低エミッタンスリングとする、iii)できる限りR&Dを必要とする要素技術を持ち込まない、などの諸条件を設定して迅速なビーム立ち上げが可能であろうと思われる4バンドラティスからなる14セルの直積リングを設計した。図2に1セル分のラティス関数を示す。これは一見して分かるように、直線部の長さが異なる2つのダブルバンドラティスを合体したようなハイブリッドオプティクスである。低エミッタンスの実現のために5 mの直線部に6.9 cmのエネルギー分散を入れ、また偏向磁石は4極成分を入れた機能複合型を用いて減衰分配係数 J_x を1.44まで大きくした。リングの諸パラメータを表1に示した。

自然水平エミッタンスは1.1 nmrad であるが、1 nmrad 以下のエミッタンスを求めると直線部のエネルギー分散関数を大きくする、あるいはセル数を増やしてリングを大きくするしか手がない。直線部のエネルギー分散が大きいとエネルギー広がりによる横方向位相空間への影響が無視できなくなる。このラティスでは直線部のエネルギー分散を約11 cm にすれば自然エミッタンスは最小値の0.96 nmrad

表1 SLiT-J 蓄積リングの主要パラメータ

電子ビームエネルギー	2.998 GeV
ラティス構造	4-bend cell
周長	339.92 m
セル数	14
直線部	5.00 m × 14
短直線部	1.11 m × 14
ベータトロンチューン	(25.85, 6.75)
自然クロマチシティ	(-64.8, -44.7)
自然水平ミッタンス	1.10 nmrad
運動量収縮因子	0.00055
自然エネルギー幅	0.0825%
直線部のラティス関数	$(\beta_x, \beta_y, \beta_x) = (13.2, 2.96, 0.069) \text{ m}$
減衰分配係数	$(D, J_x, J_s) = (-0.442, 1.442, 1.558)$
減衰時間	$(\tau_x, \tau_y, \tau_s) = (8.2, 11.9, 7.6) \text{ ms}$
偏向磁石による放射損失	0.573 MeV/turn
RF 加速周波数	508 MHz
RF 加速電圧	3 MV
ハーモニック数	576
自然バンチ長	3.43 mm (11.1 ps)

をとるが、実効的なエミッタンスの最小値ではない。尚、直線部のエネルギー分散を消した場合のエミッタンスは1.8 nmrad になる。

3. ビーム動力学における非線形性の抑制

線形範囲のビームオプティクスが決まったからといって、そのリングが機能するわけではない。電子のエネルギー偏差やベータトロン振動振幅から発生するチューンシフトを出来る限り抑制しなくては、電子が周回しうる力学的口径 (Dynamic Aperture) が確保できない。エネルギー偏差によるチューンシフトは非常に大きいので、これを抑制する為に6極磁石を導入するが、これによってベータトロン振動振幅によるチューンシフトが励起される。これを抑制しようとするとき再びエネルギー偏差チューンシフトが増大するなどの極めて「非線形」なビームダイナミクスが大きな問題であるのは、どの低エミッタンスリングでも共通課題である。数学的に綺麗にこれを消去する手法も示されているが、大抵の場合は周長などのリング設計の境界条件がこれを阻むことになる (Spring-8II についての田中均氏の解説を参照頂きたい)。SLiT-J 設計では、この「非線形」なビームダイナミクスにおけるもぐら叩きについて東北大学電子光センターの武藤俊哉氏による遺伝的アルゴリズム (GA: Genetic Algorithms) による力学的口径拡張手法を用いて、6ファミリーの6極磁石の最適化を行った。単純に垂直方向と水平方向の振動振幅依存チューンシフトの(局所的ではあるが)最小値を求める方法で得た6極磁石の設定でもSLiT-Jの力学的口径はさほど狭くないが、GAによってさらに拡張できた。GAは厳密解を与えるわけではないが、例えばバンチのピーク電流が高い場

合に必要な大きな正のクロマチシティでの最適解も発見できるため、極めて現実的に有効な方法である。実際にも高電流シングルバンチ運転に求められるような高いクロマチシティ値 (+5) にしても殆ど力学的口径が変わらない解も得ている。面白い事に、この場合は6ファミリーの6極磁石の強度バランスが変わるだけで、磁場強度はあまり大きくならない。

ビームパイプのインピーダンスや ps オーダーの短いバンチが放出するコヒーレントな放射光による不安定性については更なる検討が必要ではあるが、電磁石のミスアライメントがほどほどにあった場合でもビーム入射が行なえる十分な力学的口径が確保できる結果を得ており、SLiT-J ラティスは「安定」なリングと結論できる。

4. 挿入光源

SLiT-J はセル間に5.0 m の直線部を挿入し、他にセル中心に1.1 m の短直線部を設けてある。挿入光源からの放射パワーは周期数に比例するので周期数が多いほど光源性能が上がる、という考え方は間違いではないが、ビームのエネルギー広がりによって共鳴波長の強度は頭打ちになる。また、長い直線部では両端でベータ関数が大きくなるため、長尺アンジュレータを狭いギャップで運転する場合のビーム損失は危険である。一方で短周期アンジュレータの技術進歩が急速であり、全長4 m 程度の短周期アンジュレータで非常に高い軟 X 線輝度を得られることを考えると、むやみに長い直線部の必要性はあまり感じられない。もちろん偏光スイッチングなどの特殊な技術を駆使するように極端に長い直線部の活用法はそれなりにあるだろうが、SLiT-J ではそのようなオプションを考慮していない。部分的に長い直線部を導入すれば、ラティス構造が複雑化して更に周長を長くするので、さほどメリットを感じられない。一方 SLiT-J では、セル中央の1.1 m の短直線部に従来の挿入光源の視点と異なったマルチポールウィグラーの導入することにより、偏向磁石からの放射光に比べて格段に大きい高エネルギー連続 X 線のフラックスを得るオプションを採用している。20 keV 以上の硬 X 線は中重元素分析には必須であり、ユーザーサイドの利用要求も多い。偏向磁石からの光はあまりに弱い、低エネルギーリングでも超伝導偏向磁石を導入するなどして X 線源として利用している。SLiT-J では偏向磁石からの放射

光は一切利用せず、そのかわり干渉効果はないが連続硬 X 線源として15周期程度の高ピーク磁場強度のマルチポールウィグラーを短直線部に挿入することにした。偏向磁石の磁場を上げれば高エネルギー側に放射光スペクトルがシフトするが、リングでの基礎代謝的な放射光パワー損失が大きくなる為に、加速空洞への負担が馬鹿にならない。マルチポールウィグラーからの高エネルギー放射光はパワー損失が少ないだけでなく、輝度は上がらないがフラックスは周期にほぼ比例して増大するので強力な硬 X 線源となる。もちろん干渉効果がある低エネルギー側はそのままアンジュレータ光として利用も可能だが、それはこのマルチポールウィグラーの本務ではない。

供給可能な放射光波長範囲を広くとることばかりが能ではないだろうが、東北放射光施設がより多くの研究・開発分野で利用されるために、表2に挙げる VUV から X 線までをカバーする4種の代表的な挿入光源を当初案とした。

5. フルエネルギー入射器

フルエネルギー入射器である C バンドリナックは、ほぼ SACLA のレイアウトを踏襲することになっている。入射のみを考えると500 kV のパルス DC 電子銃は冗長であるが、将来の FEL 開発に高品位電子源は必須である。バンチあたりの電荷は最大で1 nC とするが、これは蓄積電流が0からの積み上げ時のみで、トップアップ運転中は数100 pC で十分である。規格化エミッタンスは通常5 mmmrad 程度であり3 GeV 加速後は1.7 nmmrad までに縮小し、リングの力学的口径より遥かに小さなビームサイズで入射できるため、ビーム損失が殆どない高効率入射が可能である。C バンド加速構造は SACLA で使われている複雑なチョーク構造を用いない単純なものにするので、40 MV/m 以上の加速勾配が得られる。従ってリナック本体の長さは100 m にも満たないが、C バンドリナックへ入射するまでに電子銃からのビームをサブハーモニックバンチャーやコレクションキャビティ、磁気バンチ圧縮器で整形する必要があるため、入射器全体の長さは110-120 m 程度となる。将来どのような FEL 開発を行なうべきか、議論を尽くしていないが最低限のインフラ整備を初期に行なわなくてはならない。特に FEL ビームラインのスペースはぜひとも確保しておきたい。

表2 SLiT-J の挿入光源(案)

挿入光源	偏光タイプ	周期長 (mm)	周期数	光子エネルギー範囲 (keV)	輝度*/フラックス密度**) @400 mA
HXU	直線	18	241	1.3-30	10 ¹⁹⁻²¹ /10 ¹⁷⁻¹⁹
SXU1	円/楕円	42	104	0.2-2.0	10 ^{~21} /10 ^{~18}
SXU2	円/楕円	64	68	0.04-1.3	10 ¹⁹⁻²⁰ /10 ¹⁷⁻¹⁸
MPW	直線	50	16	1-100	10 ¹⁵⁻¹⁷ /10 ¹³⁻¹⁵

*)photons/s/mrad²/mm²/0.1%b.w., **)photons/s/mrad²/0.1%b.w.

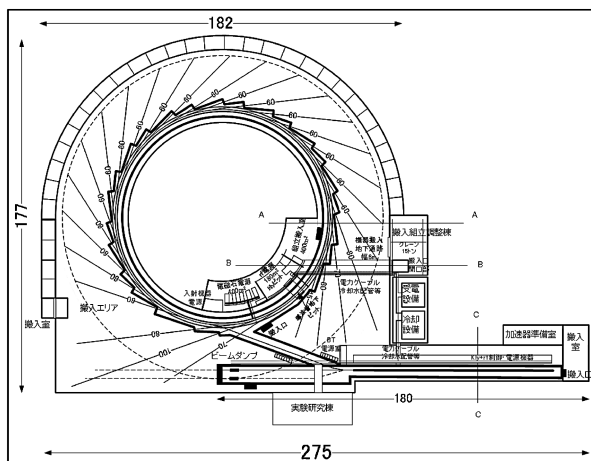


図3 SLiT-J 建屋平面図（暫定案）

6. フロアプラン, その他

SLiT-Jの一番大きな特徴はコンパクトでありながら高輝度放射光を供給することにある。最近立ち上げられたスペインの3 GeV 光源 ALBA に比べるとやや周長は長いですが、エミッタンスは約1/4で輝度は1桁以上高い。光源施設全体もコンパクトであり、図3に示した建屋平面図のように280 m×180 mの敷地に納まる。

光源リングや入射器に加えて制御、ビームライン、ユーティリティを含めた施設全体の消費電力見込みは約3.7 MWである。この値はかなり小さいが、電磁石などもすべてコンパクトに設計してあるからこそである。SPring-8の消費電力はSACLAも含めて約40 MWであるから、省エネ設計を納得頂けるのではないかと思う。現在のソーラーパネルの発電能力を考えると、この施設の屋上すべてを使った太陽発電によって約3.4 MWを賄うことができる。震災以降は大規模な企業工場でも MW 級のソーラーパネル発電を備えるところが増えている。研究施設といえども、今後はこのような自助努力によるエネルギー対策が核心的に位置づけられてゆくことは明白であろう。

現在 JASRI/理研の有志の協力を得て、現在加速器構成機器も含めた最初のバージョンの CDR (Conceptual Design Report) を纏めている。東北放射光計画では唯一と言

ってよい R&D を必要とする機器が JASRI 加速器部門の恵郷博文氏提案による TM020モードを用いた高周波加速空洞である。これは邪魔な高調波モード (HOM) を殆ど抑制して、必要とする加速電圧、ビームパワーをコンパクトに供給できる新しいアイディアの空洞である。東北放射光リングは直線部数が14と少ないので、空洞ステーションは一カ所の直線部に留めたい。従来の両端に HOM 吸収体を配した TM010空洞 1 台ではリングのドライブが不可能であるため、この新空洞への期待は大きい。電磁石、真空チェンバー、排気システム、制御等の細部にわたった検討は今後も継続するが、出来る限り早急に CDR を完成して多くの方々から助言を頂きたいと考えている。

おわりに

東北放射光計画は、東北地方やその周辺地域での科学技術・産業技術の革新的振興を視野に、本邦の世界トップクラスの放射光科学を更に推進し、新たなイノベーション創出によって科学技術立国たる日本の優位性維持を支援する中型高輝度放射光源施設を東北地区に建設しようとするものである。現在東北地区7 国立大学総長からなる推進会議およびその補完組織である専門委員会・支援協議会が、実現に向けて鋭意奮闘しているところである。研究センターとしてはもちろん図3に示した加速器施設の他にも研究棟などの諸施設が必要であるし、レストランや宿泊施設も欠かせないであろう。しかしながら、それらは東北放射光施設がどの地につくられ、どのような形態で運営されるべきか明確にしてから考えればよい。「オールジャパン」と言うは易しであるが、真の意味のオールジャパンとは何なのか、何がオールジャパンなのか深く考えて行かなくてはならない。しかも放射光コミュニティが一致したからと言って自動的に予算獲得できるものでもない。冒頭に述べたように、東北放射光が担うべき日本の未来創造への科学の振興は、携わる地域のみならず全ての人々の精神活動とこころの豊かさを伴ってこそ、この計画の成就ではないかと思う。科学者のみならず多くの方々からのご理解とご支援を頂いて、最初の一步を早期に踏み出せることを願っている。