

## 特集 国際リニアコライダー (ILC) 計画と新しい科学プロジェクトのあり方

## グリーン ILC

佐伯 学行\*

Green ILC

Takayuki SAEKI\*

## Abstract

The design of International Linear Collider (ILC) is based on the Superconducting RF (SRF) technology, which is more efficient than the normal conducting technology in terms of the energy consumption. However, still the total energy consumption of ILC (500 GeV) is 164 MW, which is much larger than those of existing accelerators in the world. In such a situation, the reduction of energy consumption in ILC, thus the efficient and sustainable design of ILC, is the crucial issue to realize it in the near future in a Japanese site. In order to challenge the issue, we organized a working group, so called “Green-ILC WG” in the Advanced Accelerator Association (AAA) in Japan, which involves 112 companies from industry and 42 organizations from academia. The Green-ILC WG is also collaborating with the international team of ILC. The activities are covering the studies on the efficient design of components, accelerator sub-systems, ILC-system, and even ILC-city. This presentation will report the current status of these studies.

## 1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) の加速器は超伝導加速器リニアックを基礎とした設計であるため、常伝導加速器に比較して消費電力は少なくすることができる。しかしそれでもなお、その運転時の総消費電力は、衝突エネルギーが 500 GeV の時<sup>†</sup>に 164 MW となる (表 1 を参照)。これは現存する加速器と比較して膨大なエネルギー消費であり、ILC を実現するためには消費エネルギーの削減は非常に重要な問題となる。

中でも主リニアックは 106 MW を占め、更にもうその中で RF power が 52 MW、ヘリウム冷凍機が 32 MW を消費し、残り 20 MW あまりが空調、冷却水、照明、制御ラックに使われる。この主リニアックは同種の機器が繰り返し使われ長い直線型加速器を構成しているため、これらの機器の省エネルギー化および高効率化が全体の省エネルギー化と高効率化に大きく寄与する。

また、膨大な電力を使用して行う科学実験は、

その電力供給圏内の人々の日常生活に不便をかけることは避けなければならないし、その住環境に排熱、騒音、景観などで影響を与えることは最小限に留めなければならない。電力エネルギーを効率良くビームエネルギーに変換して科学的実験を行った後は、ILC の施設から排出されるエネルギーを回収し、再利用する方策をとらなければならない。使用する電力エネルギー自体もただ単に購入するだけではなく、持続可能・再生可能エネルギー源から取り出して利用し、地球全体からみて放出炭素量を増やさないことが望ましい。ここ

図 1 ILC のエネルギー消費の内訳 (ILC Technical Design Report (TDR)<sup>1)</sup> から)。

Accelerator section	RF Power	Racks	NC magnets	Cryo	Conventional		Total
					Normal	Emergency	
e <sup>-</sup> sources	1.28	0.09	0.73	0.80	1.47	0.50	4.87
e <sup>+</sup> sources	1.39	0.09	4.94	0.59	1.83	0.48	9.32
DR	8.67		2.97	1.45	1.93	0.70	15.72
RTML	4.76	0.32	1.26		1.19	0.87	8.40
Main Linac	52.13	4.66	0.91	32.00	12.10	4.30	106.10
BDS			10.43	0.41	1.34	0.20	12.38
Dumps					0.00	1.21	1.21
IR			1.16	2.65	0.90	0.96	5.67
TOTALS	68.2	5.2	22.4	37.9	20.8	9.2	164 MW

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

<sup>†</sup> 衝突エネルギーが 250 GeV の時は、主リニアック部分の消費電力 (106 MW) が約半分となる。

では、ILC における省エネルギー化と ILC に隣接して建設される街のエネルギー・ネットワークに関する検討の現状について述べる。

## 2. グリーン ILC ワーキング・グループ

ILC グループが、これらの問題に具体的に対処するために行動を起こしたのは、2013 年頃からである。2013 年に CERN において開催された第 2 回ワークショップ: Energy for Sustainable Science at Research Infrastructure<sup>2)</sup> において、鈴木厚人氏 (前 KEK 機構長), 吉岡正和氏, Denis Perret-Gallix 氏が ILC の省エネルギー化に関する発表を行った。この時の 3 人の発表の表紙を図 1 に示した。

これらの発表を契機として、ILC の省エネルギー化についての取り組みが開始された。この時の Perret-Gallix 氏の発表で使われた 1 枚のスラ



図 1 2<sup>nd</sup> WS Energy for Sustainable Science at Research Infrastructure での発表。



図 2 グリーン ILC. ILC を取り巻くエネルギー・ネットワークと街の構想図。

イドを図 2 に示した。

この図は、ILC を高効率の加速器として実現すると同時に、それを取り巻く街が ILC とエネルギーのネットワークを構築して、全体として持続可能かつ高エネルギー効率なシステムを実現している状況を示している。我々は、このようなイメージを目標として、ILC のみならず、それを取り巻く街をも含めた 1 つのシステムを構築することを目標にして行動を開始した。

具体的な行動としては、先端加速器科学推進協議会<sup>3)</sup> (Advanced Accelerator Association Promoting Science and Technology, 以降 AAA) という産学官で構成される既存の協議会の中に、ILC の省エネルギー化とそれを取り巻く街を検討するワーキング・グループを設置した。図 3 に、AAA の組織図を示した。

AAA 内には 4 つの部会があり、その内の 1 つである技術部会の中にグリーン ILC ワーキング・グループ (Green-ILC-WG) を設置した。図 4 にこれまでの Green-ILC-WG の活動の経緯を示し

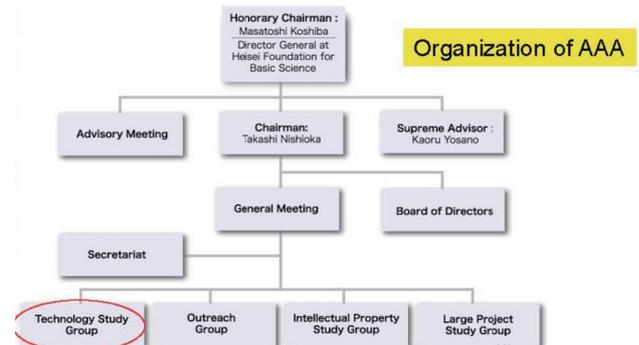


図 3 AAA の組織図。左下の技術部会の中に Green-ILC-WG が設置された。

- Three presentations were given (by A. Suzuki, D. Perret-Gallix, and M. Yoshioka) in 2<sup>nd</sup> WS “Energy for Sustainable Science at Research Infrastructure” at CERN in Oct. 2013.
- A session (four presentations) was organized for Green-ILC activities in LCWS 2013 at Tokyo in Nov. 2013. A. Suzuki also presented Green-ILC activities in the plenary session in LCWS 2013.
- Green-ILC Working Group was organized in “Advanced Accelerator Association promoting science & technology (AAA) in Tokyo/Japan. The 1<sup>st</sup> meeting for the Green-ILC WG of AAA was held on 25<sup>th</sup> February 2014. (AAA home page = [https://aaa-sentan.org/en/about\\_us.html](https://aaa-sentan.org/en/about_us.html))
- 2<sup>nd</sup> – 15<sup>th</sup> Green-ILC WG meetings were held on May 2014 – until now in Tokyo/Japan.
- Various realistic technologies of energy-saving for ILC were proposed and discussed by industries and scientists.
- D. Perret-Gallix, T. Saeki, and H. Hayano opened the interactive home page for Green-ILC activities. Please visit <http://green-ilc.in2p3.fr/> and <http://green-ilc.in2p3.fr/documents/>.

図 4 これまでの Green-ILC-WG の活動。

た. Green-ILC-WG は, これまでに 15 回の会合を開催し, 各会合においては ILC とそれを取り巻くエネルギー環境を省エネルギー化するために必要な技術を産学から具体的に提案してもらい, 継続的に協議を行っている. この活動は, 毎年報告書にまとめられて公開されている<sup>4)</sup>. 具体的な提案の詳細については, これらの報告書を参照されたい. ここでは, そのごく一部を紹介することにする.

### 3. 省エネルギー化技術の提案例

#### 3.1 ILC コンポーネント

主リニアックの RF コンポーネントに対する提案として, 東芝電子管デバイス株式会社と KEK から Collector Potential Depression (CPD) Klystron が提案された. これは Klystron の信号増幅用電子ビームの電流からエネルギーを回収して, エネルギー効率を上げようという試みである. その概念図を図 5 に示した.

クライオジェニクに関して, TDR の設計から即省電力化が可能なシステムが株式会社前川製作所から提案された. このシステムの概要を図 6 に示す. この技術では, システム内での排熱を吸収冷凍機で再利用することで, TDR のシステムよりも 3 MW の省エネルギー化を実現している.

上述の提案例は産業界からであるが, 学术界からも省エネルギー化技術の研究に関して多くの進展があった. 主リニアックの超伝導加速器に関して, 米国の FNAL 研究所において, Anna

Grassellino 氏が超伝導空洞の消費電力を数分の 1 に減らす技術を開発した. これは窒素ドープ技術と呼ばれて話題となったが, 残念なことに到達加速勾配が従来よりも低下してしまう欠点があった.

しかし, 昨年, 再び米国の FNAL 研究所の Anna Grassellino 氏によって, 到達加速勾配を高く維持したまま電力効率を数倍にする技術が開発された<sup>5,6)</sup>. これは窒素 infusion と呼ばれる技術で, ニオブ超伝導空洞の内面処理工程の後半で行う摂氏 120 度のベーキングにおいて窒素ガスを導入するというものである. これによって実現する Q 値と加速勾配の関係を図 7 に示した. 図中で N infusion と矢印で示したプロットがその実験結果である. 従来の ILC 標準処理工程で得られるプロットは, 青の△マークで示されている. このプロットに比べ, N infusion の結果は, Q 値を高く維持したまま加速勾配が 44 MV/m 近くま

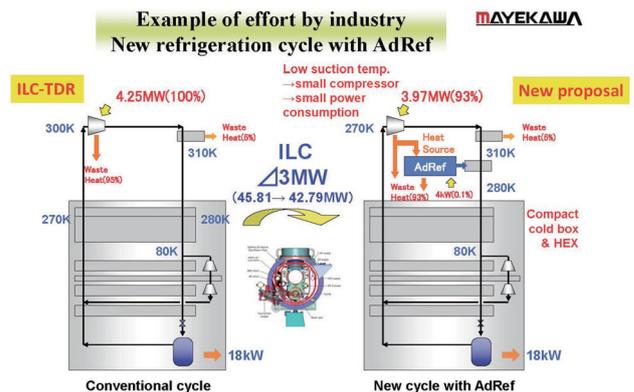


図 6 株式会社前川製作所によるクライオジェニクの省エネルギー化技術の提案.

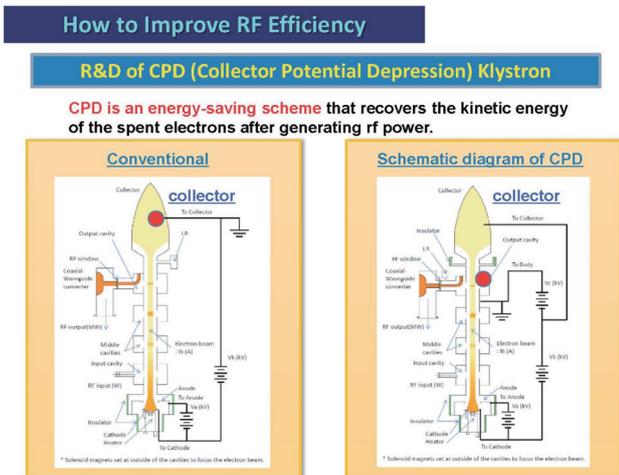


図 5 東芝電子管デバイス株式会社による Collector Potential Depression (CPD) Klystron の提案.

Then "high-Q & high gradient" are realized

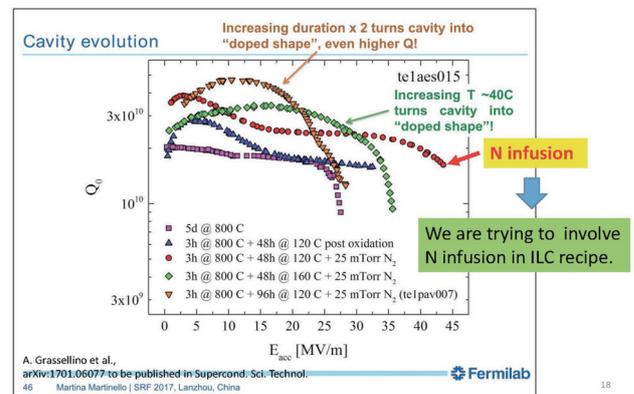


図 7 窒素 infusion 処理を行ったニオブ超伝導空洞の Q 値と加速勾配 ( $E_{acc}$ ) の関係.

で伸びているのが分かる。

超伝導空洞は、空洞製造後に、平滑な内表面を得るために内面処理を行う。ILCの超伝導空洞では、弗酸と硫酸の混合液を使った化学液を使って電解研磨を行う内面処理が標準である。しかし、この混合液は強い毒性があるため、そのままでは廃棄することができず、中性化の廃液処理が必要である。現在、米国のFaraday Technology Inc.社とFNAL研究所<sup>7)</sup>、JLab研究所、Cornell大学<sup>8)</sup>、また、日本のマルイ鍍金工業株式会社、岩手大学、野村鍍金株式会社<sup>9)</sup>とKEKが、希硫酸液、希アルカリ液、更に全く無害な中性液で電解研磨を行う技術の開発を行っている。この技術が実現すると、ILCの量産工程における環境負荷は大幅に軽減され、持続可能性が大きく向上する。図8に、野村鍍金株式会社とKEKが発表した中性液によるニオブのサンプル・クーポンの電解研磨の研究を示した。

加速器施設のビーム・ダンプは、放射化してしまうために、冷却水の取り扱いや、エネルギーの回収が非常に困難なコンポーネントである。KEKでは、ビーム・ダンプについて放射化を低減し、なおかつエネルギーの回収を行う技術の開発を行っている<sup>10)</sup>。図9に、その研究に関する図を示す。

近年、プラズマによる荷電粒子の加速が盛んに研究されているが、電子ビームがプラズマで加速できるなら、減速することも可能なはずである。このアイデアから出発してプラズマによるビーム・ダンプの研究開発を行っている。適切なパラメータに調整したガス・チェンバー内に電子ビームを入射すると、電子ビームによりプラズマが発

生し、大部分のビーム・エネルギーがプラズマ・エネルギーに変換されるというものである。この方法では、電磁気力を介してエネルギーがプラズマに変換されるため、物質の放射化がほとんど起きないという利点がある。このため、冷却水からの熱エネルギー回収も容易になる。

ここで紹介した技術は、クライオジェニクに関する提案以外は、実用化までにまだ研究開発が必要である。しかし、これは日本加速器学会誌の記事として研究者が興味を持ちそうな技術を選択して紹介したためである。一方で、Green-ILC-WG会合で提案された多くの技術は、既存の技術を巧みに利用して省電力化が可能な技術が大半を占める。このため、もし数年後にILCの建設が始まった場合にも、前述の報告書に記載された多くの技術が実際に採用されるものと考えられる。

### 3.2 ILC サブ・システム

図10に、ILC-TDRで検討された配電システムの概要を示した。ILCは約30 kmにも及ぶトンネル内に加速器が設置されるため、その配電シス

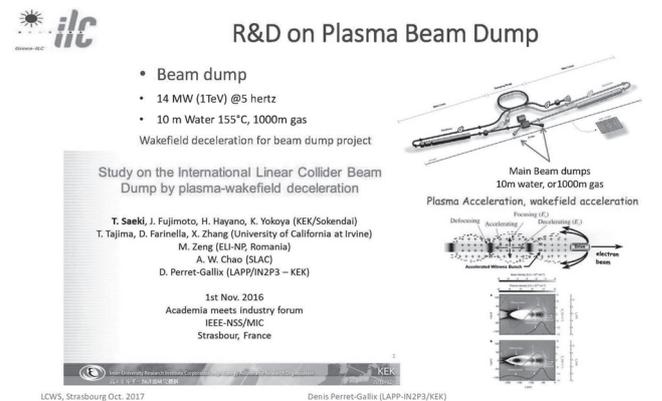


図9 プラズマ・ビーム・ダンプの研究開発。

### R&D on EP process with NaCl water (salt water), instead of HF mixture.

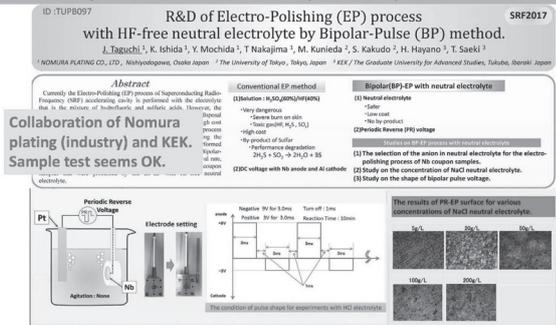


図8 超伝導空洞の電解研磨処理に無害な中性液を使用する研究。

### Considerations on Power Supply System in ILC-TDR

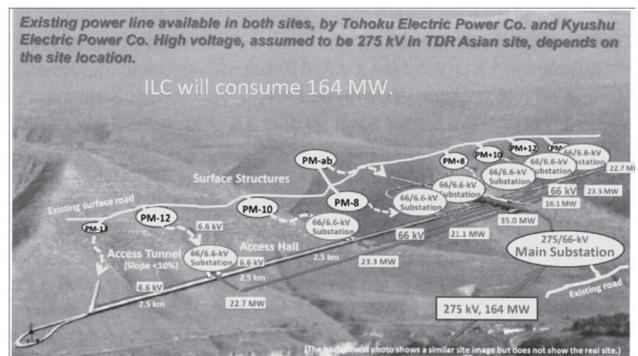


図10 ILCにおける配電システム。

テムにおける電力損失を最小化することは高効率化に大きく寄与する。

株式会社フジクラから、ILCの電力配電システムに直流高温超伝導送電ケーブルを使用する技術の提案があった。近年、高温超伝導体による直流送電ケーブルは、実用化への研究開発が行われているが、送電線を液体窒素によって冷却する施設が必要であり、商用利用での実用化はまだ難しい側面もある。これに対し、ILCでは超伝導加速器用の巨大クライオジェニック・システムが施設内にあるため、高温超伝導送電ケーブルによる送電を取り入れることは比較的容易と思われる。

ILCの電力は、できるだけ再生可能エネルギーを利用して運転を行うことを目指している。しかし、風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーは、一般的に電力供給量が変動するという弱点がある。このため、電力供給源を多様にして電力GRIDを構成することで電力供給能力の平滑化を行うことが必須である。また、ILCでは大量の液体ヘリウムを扱うため、電力が失われた時の対策は非常に重要な課題である。このため、ILCの電力供給システムの中に、Co-Generation System (CGS)を組み入れることを検討している。

近年、理研仁科加速器研究センターのRIBF (Radiative Isotope Beam Factory) 加速器は、113番元素の生成に成功し、その命名権を得てNihoniumと命名したことで有名である。このRIBF加速器は、設計当初から省エネルギー化の努力を積み重ねて建設が行われた。更に、RIBF

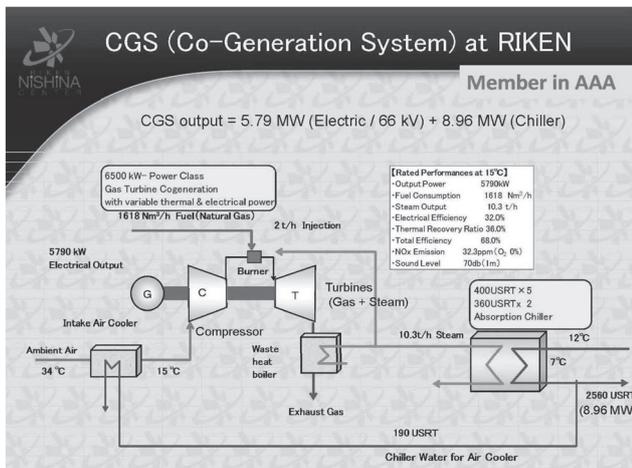


図 11 理研仁科加速器研究センターのRIBF加速器におけるCo-Generation Systemの利用。

加速器は電力供給システムにCGSを取り入れており(図11参照)、電力会社からの電力とCGSの電力を組み合わせることで運転することができる。RIBF加速器は、Uraniumイオンの加速時に18 MWの電力を消費するが、このCGSは約15 MWを供給するバックアップ電源の役割を果たしている。Green-ILC-WGでは、RIBF加速器グループとも密接な情報交換を行いつつILCの電力供給システムの検討を進めている。

### 3.3 ILCに隣接する街

多くの加速器では、冷却水への排熱エネルギーはクーリング・タワーで大気中に放出される。しかし、ILCでは冷却水の排熱を再利用することを目指している。図12に株木建設株式会社が提案するILCの冷却水排熱を利用したバイオマス発電の概念図を示す。冷却水の熱エネルギーは、いわゆる低品質熱エネルギーと呼ばれ、効率の良い再利用は難しいと言われている。これに対し、近年、バイオマス産業、食品産業、農林産業ではその排熱を高効率で利用できることが指摘されている。株木建設株式会社の提案では、各種の生産工場や市街地で排出されるバイオマス原料の乾燥にILCの冷却水排熱を利用し、その燃焼によって発電を行う。

バイオマス発電では、地域内にバイオマス資源が循環するネットワークを構築することが重要であるが、図13はそのようなネットワークを検討した例である。そのネットワークには、市街地、工場、農場、山林などが組み込まれていることが分かる。

既に何度か述べたように、ILCでは再生可能エネルギーを利用することを目指している。ユニサ

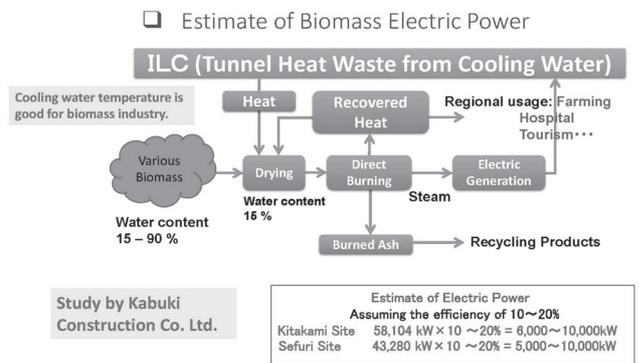


図 12 株木建設株式会社によるILCの冷却水排熱を利用したバイオマス発電の提案。

□ Biomass Power Plant using Organic Waste

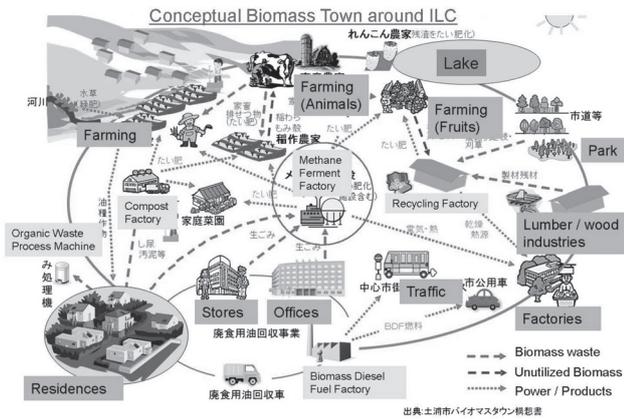


図 13 バイオマス資源が循環するネットワークの検討。

ンジャパン株式会社は、ILC に電力を供給する風力発電パークと太陽光発電パークの検討を進めている。図 14 にその検討図を示した。前述したバイオマス発電や CGS システムの電力供給を電力会社の供給する電力と組み合わせることで、再生可能エネルギーの弱点である不安定な供給量の平滑化を行うことができる。

ILC に隣接する街では、ILC の排熱を利用したバイオマス発電、各種の再生可能エネルギー、既存の電力会社の電力、工場、市街地のエネルギー網などを組み合わせたエネルギー GRID を構築する必要がある。その検討の一部を図 15 に示す。この図を見ると、Green-ILC-WG の活動成果は、2013 年に D. Perret-Gallix 氏によって示された構想図 (図 2) に徐々に近づきつつあることが分かる。

4. 研究者間の情報交換

ILC の技術開発では、引き続き性能向上とコスト削減を行う必要があり、そのような状況下で更に省エネルギー化の努力を進めることは容易ではない。このため、同じ課題に取り組む研究者間の情報交換を促進し、無駄をなくすことが極めて重要である。ILC グループでは、CLIC チームと合同で継続的に国際ワークショップを開催して、国際チームとして緊密な連絡を取り合っている。近年では、ワークショップのプログラムに加速器の省エネルギー化に特化したセッションを必ず設けて情報交換の場としている。AAA 内に設置された Green-ILC-WG は、日本国内の産学官連携の活動

A proposal of Solar and Wind Park for ILC

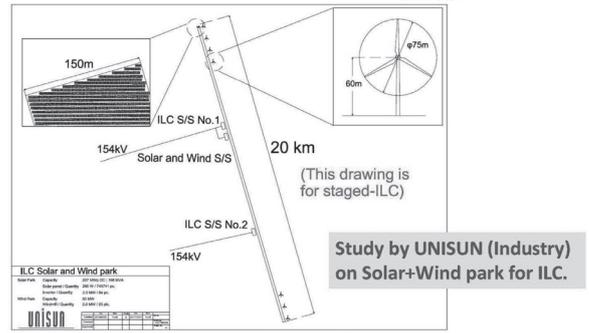


図 14 ユニサンジャパン株式会社による ILC のための風力発電パークと太陽光発電パークの検討。

Smart ILC-City by Smart GRID

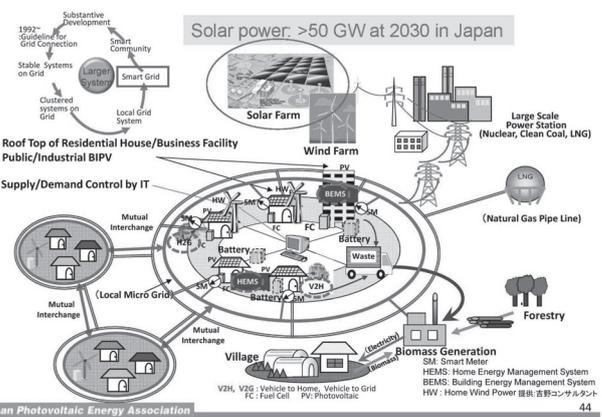


図 15 ILC に隣接する街におけるエネルギー GRID の検討例。

であるが、上述のように、国際的な LC 研究者のコミュニティーにおいても綿密な連絡を取りつつ活動を進めている。ILC チームとしては、Green-ILC の活動をインターラクティブなウェブ・ページ<sup>11)</sup> に集約して情報交換を促進している。

また、近年、International Committee on Future Accelerator (ICFA) において、加速器の省エネルギー化に関する委員会が設けられた (図 16 参照)。この委員会は、世界の主要な加速器研究所からの約 20 名の研究者で構成されており、ILC チームからは筆者と D. Perret-Gallix 氏が委員として参加している。この委員会は、多くのプロジェクト間で加速器の省エネルギー化に関する情報交換を促進する原動力となっている。特に European Spallation Source (ESS) 計画では、前述の D. Perret-Gallix 氏の構想図 (図 2) の概念をほぼ実現しつつ建設が進んでおり、省エネル



図 16 ICFA 内に設置された加速器の省エネルギー化委員会について。

省エネルギー化加速器を実現する雛形として非常に貴重な情報源となっている。

## 5. ま と め

国際リニアコライダー (ILC) の加速器では、衝突エネルギーが 500 GeV の時に、運転時の総消費電力は 164 MW にもなる。ILC を実現するためには消費エネルギーの削減は喫緊の課題である。この課題を産学官で解決するために、先端加速器科学推進協議会 (AAA) の中にグリーン ILC ワーキング・グループ (Green-ILC-WG) を設置した。Green-ILC-WG では、これまでに 15 回の会合を開催し、各会合においては ILC とそれを取り巻くエネルギー環境を省エネルギー化するために必要な技術を継続的に検討してきた。その検討範囲は、ILC コンポーネント、ILC サブ・システム、ILC システム、ILC に隣接する街のエネルギー GRID にまで及ぶ。限られた資源において効率的に活動を進めるために、同じ課題をもつ研究者間の情報交換を最大限に高めて活動を行うことが非常に重要である。このために、定期的に行われる LC ワークショップ、Green-ILC のインターラクティブなウェブ・ページ<sup>11)</sup>、ICFA の加速器省エネルギー化委員会などの交流を最大限に活用しつつ活動を行っている。

## 6. 謝 辞

この原稿を書くにあたり、AAA の Green-ILC-

WG のメンバー、ILC チーム、CLIC チーム、ICFA の加速器省エネルギー化委員会のメンバーから多くの協力をいただきました。ここに心から感謝を申し上げます。

## 参考文献

- 1) <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- 2) <https://indico.cern.ch/event/245432/>
- 3) 先端加速器科学技術推進協議会, The Advanced Accelerator Association Promoting Science & Technology (AAA), home page, <http://aaa-sentan.org/>
- 4) 2015 年日本語版報告書, <https://aaa-sentan.org/pdf/GreenILC-Report-J-2015.pdf>, 2014 年英語版報告書, <https://aaa-sentan.org/pdf/GreenILC-Report-E-2014.pdf>, 2014 年日本語版報告書, <https://aaa-sentan.org/pdf/GreenILC-Report-J-2014.pdf>
- 5) Anna Grassellino (FNAL), et al., Unprecedented Quality Factors at Accelerating Gradients up to 45 MV/m in Niobium Superconducting Resonators via Low Temperature Nitrogen Infusion, <https://arxiv.org/abs/1701.06077>
- 6) IPAC2017 at Copenhagen, Anna Grassellino (FNAL), THPPA2, New Breakthroughs and Future Directions in SRF Technology Research, [http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2017/talks/thppa2\\_talk.pdf](http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2017/talks/thppa2_talk.pdf)
- 7) SRF2013 at Paris, Allan Rowe (FNAL), TUIOC02, Bipolar EP: Electropolishing without Fluorine in a Water Based Electrolyte, [https://indico.in2p3.fr/event/8939/contributions/47662/attachments/38412/47473/TUIOC02\\_TALK.pdf](https://indico.in2p3.fr/event/8939/contributions/47662/attachments/38412/47473/TUIOC02_TALK.pdf)
- 8) SRF2017 at Lanzhou, Fumio Furuta (Cornell University), TUPB074 - RF Performance of Multi-cell Scale Niobium SRF Cavities Prepared with HF Free Bipolar Electro-polishing at Faraday Technology, <http://vrws.de/srf2017/papers/tupb074.pdf>
- 9) SRF2017 at Lanzhou, Junji Taguchi (Nomura Plating Co., Ltd.), TUPB097 - R&D of Electro-polishing (EP) Process with HF-free Neutral Electrolyte by Bipolar-pulse (BP) Method, <http://vrws.de/srf2017/papers/tupb097.pdf>
- 10) Outlook on Wake Field Acceleration: the Next Frontier, at CERN / October 2015, Takayuki Saeki (KEK), Study on the recovery of the beam energy of International Linear Collider (ILC) by plasma-wakefield deceleration, [https://indico.cern.ch/event/370571/contributions/878515/attachments/1188902/1725096/11\\_Saeki\\_T.pdf](https://indico.cern.ch/event/370571/contributions/878515/attachments/1188902/1725096/11_Saeki_T.pdf)
- 11) <http://green-ILC.in2p3.fr>, <http://green-ilc.in2p3.fr/documents/>