

グリーン ILC に関わる最近の研究

RECENT RESEARCH ACTIVITIES RELATED TO GREEN ILC

吉岡正和^{#,A)}, 照沼信浩^{B)}, 佐貫智行^{C)}

Masakazu Yoshioka^{#,A)}, Nobuhiro Terunuma^{A)}, Tomoyuki Sanuki^{B)}

^{A)} Iwate University

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

^{C)} Tohoku University

Abstract

“Sustainability”, especially ‘Life Cycle Assessment (LCA)’, has been one of the most important issues in accelerator-related international conferences for more than 10 years. The Sustainability Session played an important role in the following ILC-related workshops held since last year: LCWS2023 (SLAC, May 2023), WSFA2023 (Morioka, September 2023), SUSTAINABLE HEP 2024 (Remote, June 2024) and LCWS2024 (Tokyo, July 2024). Sustainability LCA is now one of the key issues in determining the future of large accelerator research facilities and can influence the siting of future large accelerator projects. This paper summarizes the issues to be considered regarding sustainability, based on the discussions at recent international conferences.

1. はじめに

サステナビリティ(持続可能性)、特にその「ライフサイクルアセスメント(LCA)」は、10年以上前から加速器関連の国際会議で重要な課題の一つとなっている。例えば昨年から開催されている以下の4つの ILC 関連ワークショップにおいて Sustainability Session は重要な役割を果たしてきた: LCWS2023 (SLAC, 2023 年 5 月)[1]、WSFA2023 (盛岡, 2023 年 9 月)[2]、SUSTAINABLE HEP 2024 (フル・リモート, 2024 年 6 月)[3]、LCWS2024 (東京大学, 2024 年 7 月)[4]。持続可能性に関する LCA は、今や大型加速器研究施設の将来を決定する上で重要な課題の一つになっており、将来の大型加速器プロジェクトの立地にすら影響を与える可能性がある。本稿では、最近の国際会議での議論を踏まえ、持続可能性に関して考慮すべき事項をまとめる。

そもそも何故に地球温暖化が加速しているのだろうか。産業革命以前、人間の活動によって排出される CO₂ と自然界が吸収・蓄積する CO₂ がバランスしており、地球規模の寒暖サイクルは自然現象であった。CO₂ は森林、土壌、海洋、大気などに蓄積されているが、産業革命以降、化石燃料燃焼の急激な増加による大量の炭素の開放によって排出量と吸収量のバランスが崩れ、大気中の CO₂ 濃度が急速に上昇している。それと同時に人間の活動、特に森林を大規模に破壊して行われる農地の拡大と、トウモロコシや大豆など特定作物の集中栽培は、自然の CO₂ 吸収・貯留能力を大きく損なっている。つまり、人間の活動は二重に大気中の CO₂ 濃度を上昇させる方向に作用している。この事実を踏まえれば、いま私たち人類がなすべきことは明白で以下の 2 点に集約される。

- (1) 温室効果ガスの過剰な排出を減らす努力をすること。
 - (2) 自然の CO₂ 吸収能力を回復させる努力をすること。
- 以上のことを踏まえて、我々加速器研究者も人類の一員

[#] masakazu.yoshioka@kek.jp

として考えるべきことを整理する。

- (1) 加速器研究者は研究施設の設計段階から消費電力あたり可能な限り高い性能を達成するよう努めるべきである。
- (2) 加速器研究者は加速器、検出器コンポーネント、コンピューティングなど個々の装置の電力効率を高めるよう努力すべきである。
- (3) 加速器研究者は、MTBF (平均故障時間間隔) を向上させ、MTTR (平均修理必要時間) を短縮することにより、施設の稼働率を100%に近づけるよう努力すべきである。
- (4) 加速器や研究施設から放出される低品位の熱エネルギーを可能な限り回収し、社会に還元するよう努力すべきである。

2. LCWS2023, WSFA2023, LCWS2024 における議論の整理

2.1 世界各国の発電時の CO₂ 排出量

このことについては加速器学会誌に本稿の著者の一人(吉岡)が詳しく書いたので参照頂きたい[5]が、ここではその一端を示す。加速器を稼働させるための電力は大別して①再生可能エネルギー、②化石燃料、③原子力の3種類の方法でつくられる。どの方法も多かれ少なかれ CO₂ 排出を伴う。世界各国の電力 1 kWh 発電時に排出する CO₂ の現状と将来予測[6]をみると、欧米に比較して日本は非常に多い。例えば 2020 年に日本は 450 g_{CO2}/kWh 程度であるが、欧州はその半分以下である。2050 年予測では欧州はほぼゼロエミッションを目指しているが、日本は 100 g_{CO2}/kWh 程度残る。

EU は国境を越えて電力網が接続されており、そのため国によって異なる電源(原子力、水力、風力が3大電源で、少ないが火力と太陽光もある)の平準化がやり易いし、電力フロー(潮流)制御も国境を跨いで実施され

ており、交流周波数 50 Hz が乱れるようなことはない。

一方、日本は島国であり、一国で完結して電力需給バランスをとる必要があり、しかも長年維持されている独立性の高い地域電力体制により、地域電力間の電力シェアに改善の余地がある。しかも 2011 年 3 月の東日本大震災による原子力事故の深い影響があって、震災以前のような原子力発電の増強は難しい。しかし、このような事情を乗り越えて、化石燃料の依存度を減らし、再生可能エネルギーを増やす努力をしていかなければならない。

2.2 CERN の方針

CERN は 2050 年に電力の 50%を再生可能なエネルギーで、50%を原子力で賄う方針が提示された。それぞれの kWh 当たりの CO₂ 相当温暖化ガス排出量は 5g と 20g であり、その平均値は 12.5 g/kWh となる。年間使用電力を 1 TWh (10 億 kWh) とすると年間 CO₂ 排出量は 12.5 千トンになる。この目標は現在のフランスの夏季電力状況と比較するとその3分の1ということである。

一方、2050 年の日本の予測は 100 g/kWh 程度であり、それは CERN が想定する値の 8 倍にもなる。その差を日本が縮める努力については後節で論じる。

2.3 Suzanne Evans (ARUP 社)による LCA

ARUP 社はロンドンに本店を置く建築・土木・都市計画・インフラなど総合的なエンジニアリングコンサルティング企業で CLIC や ILC の地球温暖化ガス排出に関するライフサイクル評価を行っている。LCWS2023、WSFA2023 および LCWS2024 において CLIC と ILC に関する評価を発表した[7]。結果のみを紹介すると ILC 建設による CO₂ 排出量は 266 千トンと評価され、その算出の方法論が示された。特に方法論が紹介されたことは重要で、今後、異なる加速器施設の LCA 実施する上で役立つ。この ILC 建設期間中の排出量は前節で述べた CERN の CO₂ 排出量 2050 年目標の 21 年分にも相当することは注目に値する。

2.4 日本の 2050 年脱炭素化の方針

日本の脱炭素化方針については筆者の一人(吉岡)が報告した。

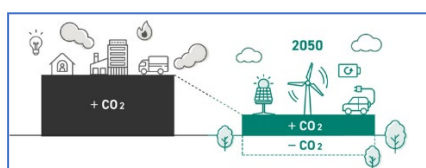


Figure 1: The Japanese government's 2050 decarbonization policy.

EU は既に 2050 年脱炭素への道筋が見えており、特に北欧では先取りしてほぼ実現している[8]。一方、日本については 2050 年の電力 1 kWh 発電時の CO₂ 排出量はゼロにはならず、100 g ほど残る。そこで日本政府の方針は Fig. 1 に示すように 2050 年までに CO₂ 排出を減らす努力を行うと同時に、吸収量、すなわちネガティブエミッションを増やして相殺する方針となっている。

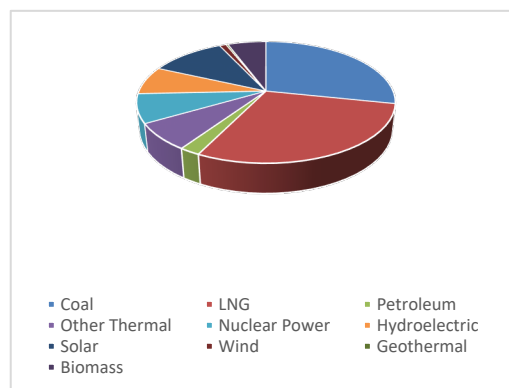


Figure 2: Preliminary figures for power source composition in FY2023.

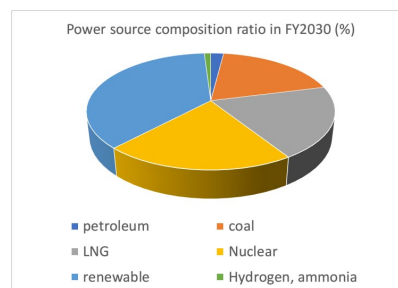


Figure 3: Target power source composition ratio for FY2030.

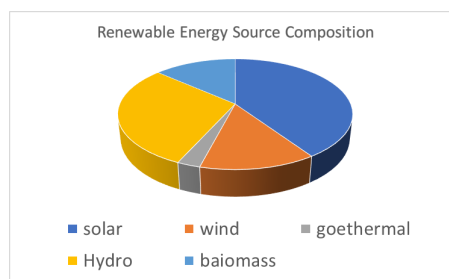


Figure 4: Breakdown of renewable energy in Fig. 3.

Figure 2 に 2023 年度電源構成の実績速報値[9]を示す。石炭 (23.8%)、LNG (29%)、石油 (2.2%)、その他の火力 (7.2%)、原子力 (7.7%)、水力 (7.5%)、太陽光 (11.2%)、風力 (1%)、地熱 (0.3%)、バイオマス (5.7%) となっている。欧州の再生可能エネルギーは水力と風力が主力であるので、日本の現状はそれと大きく異なる。

Figure 3 には政府の 2030 年中間目標を示すが、CO₂ 排出源として不利な石炭火力にまだかなり依存することになっている。Figure 4 には Fig. 3 に示した電源構成のうち、再生可能エネルギーの内訳を示す。Figure 2 の 2023 年度実績と比較すると、2030 年までの 7 年間で風力を大幅に増やす目標となっている。

2.5 日本のネガティブエミッション増強プラン

本節では Fig. 1 に示される CO₂ のネガティブエミッション(つまり CO₂ 吸収)を増加させるために為すべきことを整理する。①健全な森林の育成、②沿岸部に藻場を育

て CO₂ 吸収量を増やす、③個人住宅だけでなく高層ビルも含め大型建築に木材を多用して CO₂ の長期固定を図ること。

これらをそれぞれ「グリーンカーボン」、「ブルーカーボン」、「ホワイトカーボン」と称する。日本は降雨量が全国くまなく豊富であり管理をしっかりとすることにより森林育成条件を良くすることが可能であり、また沿岸部の長さは世界第 7 位と長く、藻場育成の適地が多いので、この政策には合理性があると考えられる。

また木造大型建築物の柱や梁などの結合部構造や、構造体の難燃化技術が最近では長足の進歩を遂げており、木造高層ビルの建設も可能になっているので、項目③も今後増えていく可能性があり、かつそのことは項目①の推進にもポジティブに関係することである。

グリーンカーボンが如何に大きなポテンシャルを持っているかを示す一例として、ILC 候補サイトが立地する岩手県一関市の森林について解析した結果を Fig. 5 に示す[10]。一関市の森林面積は 66363 ヘクタール (ha) と広く、内訳は人工林が 31465 ha (47.4%)、天然林が 34896 ha (52.6%) となっている。そもそも森林に炭素が固定されるということは、立木(りゅうぼく)が成長してバイオマスが増えることに伴っているため、森林による CO₂ 固定量を増やすためには森林を良く管理し、成長期の立木を増やすことが必要で、そのことは林業の健全な経営に帰結する。つまり伐採期の立木は適切に伐採し、そのあとにはしっかりと造林・育林を行うことである。

	Japanese cypress	forest area(ha)	Carbon fixed amount(t)	CO ₂ absorption amount(t)	Annual CO ₂ absorption amount(t)	Annual CO ₂ absorption per ha(t)	
artificial forest	Cedar	19,618	2,680,553	9,837,631	109,412	5.58	
	Japanese cypress	1,004	54,543	200,173	12,177	12.13	
	conifer	Red pine	8,928	1,327,513	4,871,974	33,537	3.76
		Kara pine	1,521	93,234	342,172	5,999	3.94
	others	33	6,655	24,424	184	5.58	
	total	31,104	4,162,498	15,276,374	161,309	5.19	
	hardwood	oak	80	5,214	19,135	610	7.63
		others	281	22,508	82,605	1,594	5.67
		total	361	27,722	101,740	2,204	6.11
	Total	31,465	4,190,220	15,378,114	163,513	5.20	
natural forest	Red pine	3,848	512,777	1,881,895	8,635	2.24	
	others	8	1,798	6,601	34	4.25	
	total	3,856	514,575	1,888,496	8,669	2.25	
	hardwood	oak	26	2,427	8,907	46	1.77
		others	31,016	2,935,948	10,774,932	131,302	4.23
		total	31,042	2,938,375	10,783,839	131,348	4.23
	Total	34,898	3,452,950	12,672,335	140,017	4.01	
	Total	66,363	7,643,170	28,050,449	303,530	4.57	

Figure 5: Analysis of Ichinoseki City forests and estimation of CO₂ absorption.

ここで算定された年間の CO₂ 吸収量は人工林が 163.5 千トン(53.9%)、天然林が 140 千トン(46.1%)、合計が 303.53 千トンにも達する。この結果からもわかるが、面積がやや少ない人工林の方が天然林よりも多くの CO₂ を吸収する。つまり森林の管理状態を改善することにより、単位面積当たりの CO₂ 吸収を増やす余地があることを示している。この現状の一関市の森林が毎年吸収する 303 千トン余りの量は 2.3 節で紹介した ILC 建設時に 10 年かけて排出する 266 千トンの CO₂ より多い量のである。これほどに自然の持つ力は大きいとも言える。

3. ILC の候補サイトが立地する岩手県の電力について

3.1 岩手県の電力構成

原理的には加速器施設が立地している地域に限らず、遠方の電気事業者と電力契約を結ぶことは可能であるが、やはり加速器施設が立地する地域の電力構成について理解しておくことは重要である。

Figure 6 は岩手県生活環境部が纏めた県全体の電力デマンドに対する再生可能エネルギーによる自給率(%)について 2022 年度までの実績と 2030 年目標である。岩手県の再生可能エネルギー自給率は現在既に 41%と全国平均の 2 倍と高く、さらには 2030 年度には 66%を目指している。

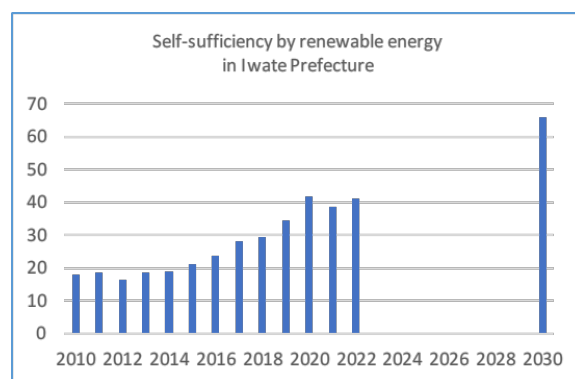


Figure 6: Self-sufficiency by renewable energy in Iwate Prefecture.

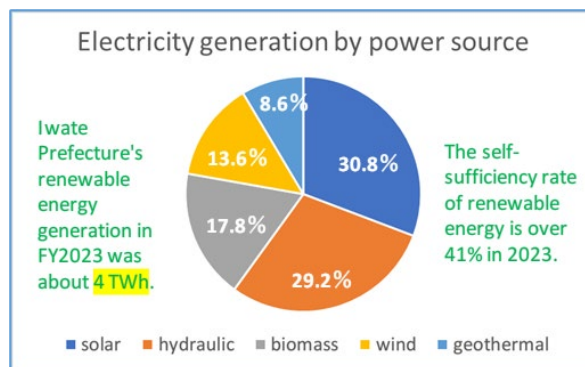


Figure 7: Breakdown of renewable energy in Iwate Prefecture shown in Fig. 5.

Figure 7 は Fig. 6 に示す再生可能エネルギーの内訳を示すが、岩手県の際立った特徴は、太陽光、水力、バイオマス、風力および地熱など 5 種類の多様な電源がバランスよく利用されていることである。Figure 4 に示す 2030 年全国目標と岩手県の現状を示す Fig. 7 を比較すると両者の違いがよくわかる。しかも再生可能エネルギーによる発電量も 2023 年度に凡そ 4 TWh に達している。

3.2 再生可能エネルギー由来の電力(グリーン電力)需要予測

岩手県には、自動車、半導体関連産業などの大規模製造工場が多く立地している。ここで世界的に持続可能な電力を使って製造された製品しか売れなくなる時代が

到来しつつあることを認識しておかねばならない。つまり各企業は皆グリーン電力によって工場を稼働させることを目指すことになる。つまり ILC もグリーン電力で稼働させるためには、早い段階から電力事業者と協力し、加速器施設で使うことのできるグリーン電力を増強・確保していく必要がある。

4. 加速器施設から排出される低品位熱エネルギーの回収

このことについては本学会におけるポスター発表があるので、詳しくはそちらを参照頂きたい[11]。ここでは、その取り組みの特徴と概要のみを紹介する。

加速器運転に使われた電力は最終的には熱エネルギーに変換され、その大部分は水冷により徐熱される。熱負荷の 5~10%程度は空調負荷となるが、最終的にはそれも水冷により除熱する。つまり変電所から導入した電気エネルギーの最終的に行きつく先は冷却塔である。冷却塔段階での温水温度は 50~100°C の範囲と「低品位」で、その再利用は難しい。CERN は LHC の温排水の熱エネルギーを近傍の自治体と協力してオンライン輸送(パイプライン)することにより社会に還元する努力をしているが、我々はこのような低品位熱エネルギーの回収と活用のために、CERN 方式ではなく、「熱エネルギー輸送媒体」を使うことにした。これにより熱源部における「蓄熱」と熱源と離れた利用サイトにおける「放熱」の両地点を配管ではなくオフライン輸送(トラック等による輸送)でつなぐ方式の事業化を目指している。

熱エネルギー輸送媒体は産業技術総合研究所・つくばセンターの鈴木正哉氏を中心にして開発された「HASclay」と命名された非晶質のヒドロキシアルミニウムシリケートと低結晶性粘土の複合体からなる無機吸収材である。超・多孔質の粉体を扱いやすくするために粒状に焼結したものを使用する。比表面積はグラム当たり 550 m²にも達する。蓄熱過程は HASclay の nm サイズの細孔に吸着している「水」に熱を加えて離脱つまり水蒸気にするのである。この媒体の最大の特徴は温度が 40°C 以上であれば水分が表面より離脱することと 1 m³ の HASclay の蓄熱量が 500 MJ を超えることである。放熱過程は逆にドライな状態になった HASclay に湿気を含む空気を送り込むだけで良い。

はじめの動機は ILC から排出される低品位の排熱を回収する目的であったが、100°C 以下の排熱は社会のいたるところで空中に放散されているので、熱源を探すことはさほど困難はなく、ILC を待つことなく広く事業化することが出来る。事業化に向けた取り組みの詳細については文献[10]に譲る。

5. サマリー

産業革命以前は、人間の活動によって排出される CO₂ と、自然界が吸収・蓄積する CO₂ がバランスしていた。そして CO₂ は森林、土壌、海洋、大気に蓄積されている。しかし産業革命以降、そのバランスが崩れ、大気中の CO₂ 濃度が上昇している。さらに人間の活動は、自然が

CO₂ を吸収・貯蔵する能力をも損なっており、つまり自然に対して二重のダメージを与えている。

人為的な地球温暖化を防ぐために加速器研究者がなすべきことは、①加速器研究施設の省エネルギー化を図り、かつそのために開発された技術を社会に還元すること、②加速器や研究施設から排出される熱エネルギーを回収し、社会に還元することと考える。

また様々な取り組みは加速器施設関係者だけではなく、次のように施設が立地する地域と連携して行う必要が有る。①地域電力の再生可能エネルギー比率の向上に協力し、可能な限りグリーン電力で研究施設を運営する。②持続可能性については運用時だけではなく、ライフサイクルにおける評価が必要で、加速器建設時に排出される CO₂ 削減にも取り組むべきである。そのためには鉄鋼はじめとする金属材料、セメント、その他の温室効果ガス排出企業の排出削減努力を理解し、可能であれば協力すること。

そして最後に、自然環境に本来備わっている森林(グリーンカーボン)や海洋(ブルーカーボン)のポテンシャルを回復するための地域の取り組みに協力することではないだろうか。そのためには林産業をはじめとする一次産業についても理解し、協力する姿勢を持つべきであると考え。

謝辞

本稿は昨年来開催された多くの国際ワークショップにおける発表を参考にした。また先端加速器科学技術推進協議会(AAA)、ILC 計画研究会(IVI)、東北 ILC 事業推進センター・グリーン ILC 部会などの参加企業との共同研究の結果も参考にした。以上のことに深く感謝いたします。筆者の一人(吉岡)は 2018 年に逝去した故・Dunis Perret-Gallix 氏にはグリーン ILC に関する活動に参加するきっかけを与えて頂いたことに感謝いたします。

参考文献

- [1] <https://indico.slac.stanford.edu/event/7467/>
- [2] <https://wsfa2023.huhep.org/>
- [3] <https://indico.cern.ch/event/1355767/>
- [4] <https://agenda.linearcollider.org/event/10134/overview>
- [5] M. Yoshioka, “科学における SDGs への取り組み, 特にカーボンニュートラルな加速器”, Journal of the Particle Accelerator Society of Japan, Vol.21, No.1, 2024, pp. 29-36.
- [6] Steinar Stapnes, “Linear Colliders, Sustainability studies for LCs, Life Cycle Assessment”, WSFA2023 (see Ref. 2).
- [7] Suzanne Evans, “Life Cycle Assessment, comparative environmental footprint for future linear colliders CLIC and ILC”, WSFA2023 (see Ref. 2).
- [8] <https://www.svk.se/om-kraftsystemet/kontrollrummet/>
- [9] 特定非営利活動法人環境エネルギー研究所, <https://www.isep.or.jp/archives/library/14750>
- [10] Hiroshi Kikuchi, “About CO₂ absorption in Ichinoseki City’s Forest resources”, WSFA2023 (see Ref. 2).
- [11] G. Mitoya *et al.*, “吸着式蓄熱材を活用した排熱回収技術の事業化と基礎研究”, 第 21 回日本加速器学会年会, WEP067, July 31-Aug. 2, 2024, Yamagata.