

ILCにおける持続可能なエネルギーマネジメントに関する研究

STUDY ON SUSTAINABLE ENERGY MANAGEMENT SYSTEM FOR THE ILC, PART-III

吉岡正和^{#, A)}, 狩野徹^{B)}, 成田晋也^{A)}, 大平尚^{C)}, 平井貞義^{D)}, 上田理絵^{E)}, 川端康夫^{F)}, 澤井淳司^{G)}
Masakazu Yoshioka^{#, A)}, Tohru Kano^{B)}, Shinya Narita^{A)}, Hisashi Odaira^{C)}, Sadayoshi Hirai^{D)}, Rie Ueda^{E)},
Yasuo Kawabata^{F)}, Junji Sawai^{G)}

^{A)} Iwate University, ^{B)} Iwate Prefectural University, Saku University, ^{C)} Iwate prefectural Office,
^{D)} NTT Facilities, Inc., Customer Solution Headquarters, ^{E)} NTT Urban Solutions, Inc.,
^{F)} TOBISHIMA CORPORATION, ^{G)} SUMITOMO MITSUI CONSTRUCTION CO., LTD.

Abstract

This paper is part 3 of the paper submitted to the 2020 and 2022 Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan. Accelerators are large electric power-loading facilities, and consideration of sustainability during their life cycle, from construction to operation and even decommissioning, is a prerequisite for a research facility to be accepted by society. This is an international consensus and is especially important when trying to attract international projects such as the ILC to Japan. Japan's factor of greenhouse gas emissions per kWh is high compared to Europe and the United States. The Japanese government, however, is in line with other countries in setting a goal of achieving carbon neutrality by 2050, and a scenario for the ILC should be drawn up in line with this goal. The government's policy is to offset emissions and absorption by increasing green carbon and blue carbon absorption, in addition to reducing CO₂ emissions through energy saving efforts and increasing sustainable energy sources. However, it is essential to obtain the cooperation of the communities where the ILC will be located, in order to attempt to increase CO₂ absorption. The authors report on the scenario in the role of the region that hosts the ILC candidate site.

1. 加速器施設からの CO₂ 排出

現在、地球は自然のサイクル(ミランコビッチ・サイクル)によって温暖化傾向にあることは事実である。人為的な要因による温暖化を疑問視する研究者もいるが、我々は自然循環だけでは説明できない急激な変化が起きていると考えているし、2050年までにカーボンニュートラルを達成するという目標を掲げた世界や日本の政府の政策も正しいと考える。

加速器は電力負荷設備であり、発電の際に CO₂ が排出される。ILC の場合、ピーク時の電力消費量は約 130 メガワット(陽電子源を電子駆動型にした場合)で、稼働時間にもよるが年間約 7 億キロワット時の電力を消費する。日本では 1 kWh あたりの CO₂ 排出量が毎年、地域の電力会社から報告される[1]。電力は次の 3 つのエネルギー源から生産される: (1) 化石燃料、(2) 再生可能エネルギー、(3) 原子力発電である。例えば、ILC の候補地がある地域では、水力発電を含む再生可能エネルギーの割合は 21%で、原子力発電はゼロ、その他は化石燃料に依存している。その結果、1 kWh あたりの係数は 480 グラム(2021 年度)となる。この値は欧米に比べてかなり大きい。この値に ILC の電力消費量をかけると、年間 CO₂ 排出量は 336 キロトンとなる。

我々は東北 ILC 事業推進センター[2]を軸にした活動について本学会に毎年いくつかの投稿をしている[3-6]。本論文はパート3である。今年 5 月に SLAC においてリニアコライダー国際ワークショップ(LCWS2023)が 4 年ぶりに対面で行われた[7]。本論文ではそこでの最新の議論も踏まえて、東北 ILC 事業推進センターの持続可

能性に関する活動(グリーン ILC)について述べる。

環境省は毎年、日本の各基礎自治体の CO₂ 排出量を評価し公表している[8]。それによると、ILC 候補地のある一関市の 2020 年度の値は 830 キロトンである。これは先に求めた 2021 年の CO₂ 排出係数に基づく ILC に起因する排出量の 2.47 倍である。ILC 稼働を目指している 2030 年代後半には発電の際の排出係数も、一関市における排出量も大幅に低下していると予想されるのでこの議論はあくまでも参考程度に留めたい。

Figure 1 は DESY の Benno List 氏から提供された発電量あたりの CO₂ 排出量である。図の左側はいわゆる先進国グループであり、日本と韓国の係数が高いことがわかる。ヨーロッパは 2019 年の電源構成比は再生可能エネルギー 35%、化石燃料 38%(内訳:天然ガス 20%、石炭 16%、石油 2%)、原子力 26%、その他 2%となっており[9]、そのため欧州の係数は日本の半分近くとなっている。フランスやスイスなど原子力が多く、北欧は水力、風力などが多く、それらが国境を越えた電力グリッドで繋がっている欧州は島国の日本とは状況が大きく異なる。日本は一国で閉じたシナリオを作らなければならない。

CO₂ 排出量を削減するために私たちは次の 3 つのことを実行する必要がある:

- 1) 加速器、実験施設などの省エネルギー技術をさらに開発すること、
- 2) ILC を可能な限り再生可能エネルギーで運営し、また ILC から排出される熱エネルギーを可能な限り回収すること、および
- 3) ILC が立地する地域と協力して CO₂ 吸収量を増やすことである。このことについて次節で詳述する。

[#] Masakazu.yoshioka@kek.jp

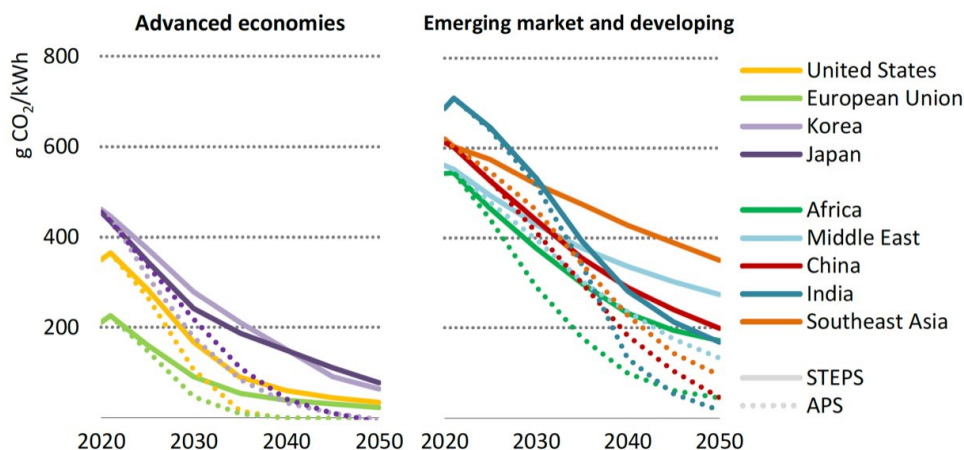


Figure 1: CO2 emission factor/kWh by country and region.

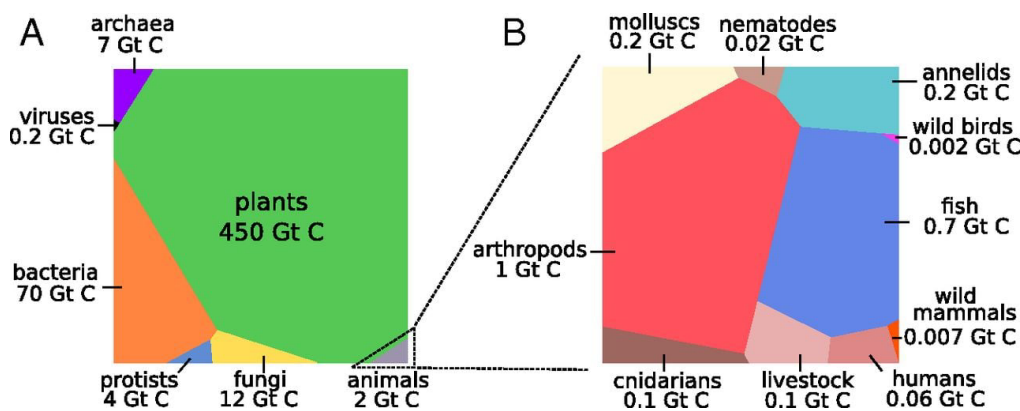


Figure 2: Breakdown of biomass on earth [12].

2. 2050年までのカーボンニュートラル達成に向けた日本政府のシナリオ

経済産業省のウェブサイトによると[10]、2030年の目標は再生可能エネルギー36~38%、原子力20~22%、水素・アンモニア1%、残りが化石燃料となっている。この構成比はよく見ると現状の欧州連合のそれに近い。Figure 1によれば、2030年のkWh当たりの換算係数は200グラム程度で、現在のヨーロッパの水準とほぼ同じであるのは当然のことである。しかし、よく見ると2050年の係数はゼロではない。では、2050年までにカーボンニュートラルを目指す方針について、これも経済産業省のホームページを見ると[11]、カーボンニュートラルの実現に向けCO₂排出量の削減に努めることはもちろんだが、同時にCO₂吸収量を増やして両者を相殺する戦略であると解釈した。我々はこの方針は現実的だと判断する。日本列島は中緯度に位置し、脊梁山脈があり、大陸と日本列島の間には日本海があって水蒸気の供給があり、しかも偏西風が吹くため、雨や雪がまんべんなく降り、年間平均降水量は1,700mmと世界平均の2倍である。農業も天然水だけで行われている。意外なことに、世界には化石水に依存した農業が多い。森林は適切に管理されれば、真に再生可能なエネルギー源となり、CO₂を吸収・

固定する。これをグリーン・カーボンと呼ぶ。また、世界第6位となる長さをもつ沿岸部の藻場を整備することでCO₂の吸収・固定が期待できる。これをブルーカーボンと呼ぶ。

ここで私たちは2つのことを知る必要がある。ひとつは「炭素がどこに貯蔵されているか」、もうひとつは「炭素を固定するバイオマスの状況」である。前者については2022年9月21日付の朝日新聞「GLOBE」に興味深い記事があった。世界の温室効果ガス排出量は520億t-CO₂相当であり、一方、炭素は森林に2兆トン、土壌に5.5~8.8兆トン蓄えられ、土壌のうち表土に3兆トン蓄積されている。大気中にも表土の蓄積量に匹敵する3兆トン蓄積される。海洋にも大量に蓄積されているが、残念ながら記事にはその情報がなかった。

後者に関して Yinon M. Bar-On らによる論文「地球上のバイオマス分布」から、もうひとつ興味深い図を紹介しよう[12]。この論文によると、Fig. 2に示すように、炭素に換算したバイオマスの総量は550ギガトンである。内訳は植物が450ギガトン(81%)と圧倒的に多い。次いでバクテリア70ギガトン、菌類12ギガトン、古細菌7ギガトン、原

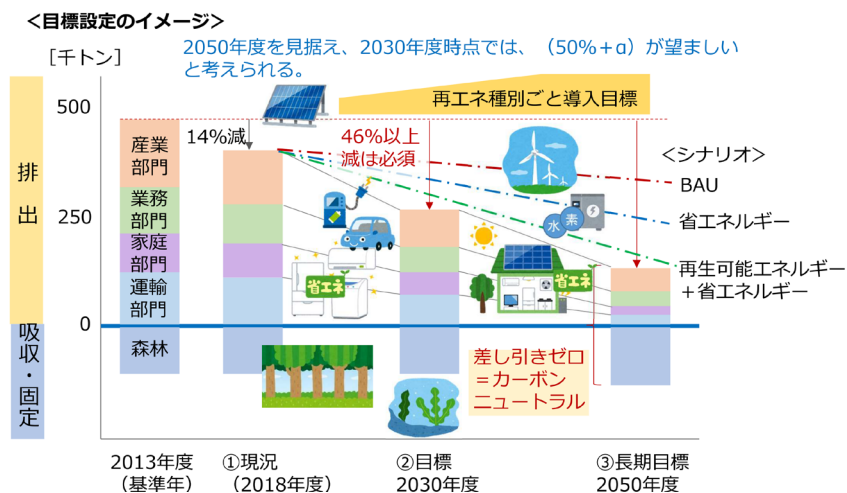


Figure 3: Scenarios for achieving carbon neutrality by 2050 in Miyako City, Iwate Prefecture [13].

生生物 4 ギガトンと続き、動物はわずかに 2 ギガトンに過ぎず、ウイルスの 0.2 ギガトンが続く。動物のバイオマスが原生生物の半分であることは驚きである。さらに、動物バイオマスの 50% は昆虫であるなど、興味深い情報が続くが、本題から外れるので割愛する。Figure 2 に日本列島に限った情報はないが、既述したように温暖な気候と豊富な降雨量により、バイオマス資源は豊富であると推察される。

2050 年までにカーボンニュートラルを達成するという政府の方針に沿ったシナリオの具体例を Fig. 3 に示す。岩手県宮古市のケースである[13]。Figure 3 の CO₂ 吸収・固定は、グリーンカーボン(森林)とブルーカーボン(藻類)によるものである。つまり CO₂ 吸収の役割は植物に頼るべきで、具体的には「ILC は農林水産業と連動すべき」ということである。

3. 農林水産業との連携が鍵となる

3.1 林業との連携

昨年の本論文 Part-II で述べたように、森林が CO₂ 吸収の切り札の一つであることについて、岩手県一関市を例にとって述べた[4]。結果のみを再録すると、同市の森林が年間に吸収する CO₂ は 303.5 キロトンである。同市から 2020 年度に排出された CO₂ は 830 キロトンである。このようにして数値を明確にすることにより、ILC の稼働が期待される 2030 年代後半における①電力当たりの CO₂ 排出係数低減、②同市の CO₂ 排出量の削減、および③ILC のさらなる省エネルギー技術進展による省電力化の進展について、それぞれ数値目標を設定して努力すべきではないだろうか。

3.2 農業

第 2 節で述べたようにカーボンが最も高密度で蓄積されているのは表層土であり、そこから CO₂ を大気に開放しないような農業(不耕栽培など)を考えていくことが重要であるが、これは ILC や加速器施設のゼロカーボンを目指した活動との接点はなかなか見いだせない。ILC と農業の関連性においては八幡平市における八幡平スマー

トファームの取り組みが挙げられる[14]。

最近の農業においては露地栽培だけでなくハウス栽培が格段に増えていることを身近に感じられるところである。ハウス栽培においては寒冷期のハウス内温度維持のための化石燃料使用が生産コストのかなりの部分を占める。そこで ILC から排出される 100 °C 以下の低品位排熱をハウス農業に活用することを考え、紙上の検討を重ねてきた。次々節で述べる排熱回収技術もその一環である。八幡平スマートファームにおいては熱源として地熱発電所からの排熱をバジルのハウス栽培に活用する事業を IoT 技術と結び付けて大規模に展開し、事業化に成功している。同社は熱源として地域に特有の未利用熱源の活用を考えており、軽米町における炭化鶏糞や ILC からの排熱についても検討を進めている。我々もその活動に協力しているところである。

3.3 ブルーカーボン

我が国は陸地面積の世界ランキングは 62 位であるが、沿岸部の長さにおいては島嶼国であるために 6 位と上位につけている。また古くから海藻を食料や肥料にする文化がある。日本では 15 年ほど前から、藻場による CO₂ 吸収がゼロカーボン政策にとって重要ではないかという見方が誕生し、各地で実践が始まっている。これを森林による吸収のグリーン・カーボンに対比して、ブルーカーボンと呼ぶ。この活動は農業と同様に ILC や加速器施設のゼロカーボンを目指した活動との接点は見出しにくい。知識としては重要であるので、概要を紹介しておく。

最も先進的な活動は岩手県洋野町である。同町は住友商事(株)と連携して、藻場を育成し CO₂ 吸収・固定によるカーボンクレジットに取り組んでいる[15]。当地の「大野海成段丘」という独特の地形を生かし、沿岸部に人工の潮だまりを形成して藻場の育成を行っている。既に森林による CO₂ 吸収に劣らない値が期待できるとの結果が出つつある。この分野はまだ新しいので、今後とも注意深く見守っていきたい。

3.4 排熱回収

この活動は岩手大学・産業技術総合研究所・東日本機電開発、他の産官学連携により 2016 年より開始し、昨

年まで本学会で報告してきた[6]。概要を述べると、産業技術総合研究所が開発したハスクレイと呼ぶ蓄熱材を用いて、①水分子の離脱による蓄熱過程と、②吸着による放熱過程を繰り返すことができる。これまでのフィールド試験においては①を温泉熱(50~60 °C)にて行い、②をイチゴのハウス栽培で行うものである。詳しくは文献に譲るが、大幅に化石燃料の使用量を減らすことができた。

さらには2021年度および2022年度の仙台市放射光トライアルユース事業の助けを得て、SPring-8における小角散乱およびSAGA-LSにおけるイメージングCTにより、詳細な蓄放熱メカニズムの研究が進められている。このようにして着実に事業化のめどは立ちつつあり、また学術的な研究も進んだ。ILC 運転開始が期待される2030年代後半までには低品位排熱回収技術は、事業として成立していることが予想される。

4. まとめと今後の課題

ILC の運用開始は2030年代後半と見込まれている。一方、日本および世界のカーボンニュートラル達成目標が2050年であることから、ILC の建設・運営における温室効果ガス排出削減努力は極めて重要である。しかし、ILC 施設単独でカーボンニュートラルを達成することはほぼ不可能であり、地域社会と連携したCO₂ 吸収量増加・オフセット対策を検討すべきである。

CO₂ 吸収量の増加は、地域の農林水産業と連携することで実現可能であり、CO₂ 排出量と吸収量の両方の数値を可視化し、具体的なアクションプランを策定することが今後の課題である。

なお、LCWS2023 においては加速器施設の運用時のみならず、建設、運用およびデコミッションにいたるライフサイクルにおけるカーボンニュートラルを目指すべきであるとの議論が国際的には主流になっている。建設時におけるCO₂ 排出量に占める割合は①コンクリート、②鉄材、③建設重機の化石燃料使用なのであるが、今後はこれらの問題にも取り組んでいきたいと考えている。幸いにも国内では既にコンクリート製造企業、製鉄産業、土木建設業などこれらの問題に取り組んでいるので、加速器に携わるものとして連携を探っていきたい。

謝辞

本論文は著者以外の多くの方々との共同ワークによるところが大きい。特に、東北 ILC 事業推進センターと先端加速器科学技術推進協議会(AAA)メンバーとの協力は重要であり、今後もこの協力関係を保っていきたい。

一関市の森林に関する解析は、一関市農林部地域林政アドバイザーの菊池宏氏による。

再生可能エネルギーによるハウス農業については八幡平スマートファーム・MOVIMASA の兒玉則浩氏による。

ハスクレイを用いた排熱回収については岩手大学・産業技術総合研究所・岩手県他の共同研究による。特に東日本機電開発(株)の水戸谷剛氏から情報提供いただいた。

林産業については(株)シェルターの安達広幸氏、(株)柴田産業の柴田君也氏、けせんプレカット事業協同組合の泉田十太郎氏はじめ多くに林産業関係者から教えて頂いた。

その他にも岩手県内で開催している「勉強会」のメンバーには多くのことを教えて頂いている。特に、(株)近藤設備の近藤真彦氏、(株)キムラの木村明義氏にはグリーン ILC に関するネットワークを築く上でお世話になった。

以上のことに著者一同深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Tohoku Electric Power Co., Inc., “Fact Book”, <https://www.tohoku-epco.co.jp/ir/report/factbook/>
- [2] Tohoku ILC Project Development Centre: <https://tipdc.org/>
- [3] M. Yoshioka *et al.*, “STUDY ON A SUSTAINABLE ENERGY MANAGEMENT SYSTEM FOR THE ILC”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, September 2-4, Online, 2020, pp. 410-413.
- [4] M. Yoshioka *et al.*, “STUDY ON SUSTAINABLE ENERGY MANAGEMENT SYSTEM IN ILC”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18-21, Online (Kyushu University), 2022, pp. 88-91.
- [5] H. Adachi *et al.*, “ECONOMIC RIPPLE EFFECT BY UTILIZING LOCAL WOOD IN THE CONSTRUCTION OF WOODEN DETECTOR PREPARATION BUILDING FOR THE ILC EXPERIMENT”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 7-10, Nagoya, 2022, pp. 1243-1247.
- [6] G. Mitoya *et al.*, “Study of utilizing waste heat from a large-scale accelerator with adsorption thermal storage materials (3) - modification of heat storage and radiation devices -”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18-21, online (Kyushu University), 2022, Presentation Slides.
- [7] International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2023), 15-19 May 2023, SLAC National Accelerator Laboratory, <https://indico.slac.stanford.edu/event/7467/overview>
- [8] Ministry of the Environment, “CO₂ emission chart for each municipality”, https://www.env.go.jp/policy/local_keikaku/tools/suikei.html
- [9] Eurostat web page, <https://ec.europa.eu/eurostat>
- [10] Ministry of Economy, Trade, and Industry, “The Sixth Basic Energy Plan”, <https://www.kankyo-business.jp/news/028931.php>
- [11] Ministry of Economy, Trade, and Industry, “Green Growth Strategies Associated with 2050 Carbon Neutrality”, https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html
- [12] Yinon M. Bar-On *et al.*, “The Biomass Distribution on Earth”, <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1711842115>
- [13] Miyako City, Iwate Prefecture, “Miyako City Renewable Energy Promotion Plan (in Japanese)”, https://www.city.miyako.iwate.jp/energy/r4miyakoshi_renewableenergy_promotionplan.html
- [14] N. Kodama, Private Communications and Hachimantai Smart Farm, <http://smartfarm.co.jp/>
- [15] Sumitomo Corporation, “Developing Blue Economy Projects by Promoting the Use of a New CO₂ Sink Acquisition of J Blue Credit® for the largest ever amount of CO₂ in Hirono Town, Iwate Prefecture”, <https://www.sumitomocorp.com/en/jp/news/topics/2022/group/20221130>