

吸着式蓄熱材を用いた大型加速器からの排熱利用に関する研究

STUDY OF UTILIZING WASTE HEAT FROM A LARGE-SCALE ACCELERATOR WITH ADSORPTION THERMAL STORAGE MATERIALS

佐々木明日香^{#, A)}, 水戸谷剛^{A)}, 赤堀卓央^{A)}, 鈴木正哉^{B)}, 万福和子^{B)}, 小久保孝^{C)}, 谷野正幸^{C)}, 佐藤現^{C)},
村岡慎一^{C)}, 高橋福巳^{D)}, 姉帯康則^{D)}, 大平尚^{E)}, 吉岡正和^{F)}, 成田晋也^{F)}

Asuka Sasaki^{#, A)}, Goh Mitoya^{A)}, Takao Akabori^{A)}, Masaya Suzuki^{B)}, Kazuko Manpuku^{B)}, Takashi Kokubo^{C)},
Masayuki Tanino^{C)}, Gen Sato^{C)}, Shinichi Muraoka^{C)}, Fukumi Takahashi^{D)}, Yasunori Anetai^{D)}, Hisashi Odaira^{E)},
Masakazu Yoshioka^{F)}, Shinya Narita^{F)}

^{A)} Higashi Nihon Kidenkaiatsu Co., Ltd.

^{B)} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

^{C)} Takasago Thermal Engineering Co., Ltd.

^{D)} WING Co., Ltd.

^{E)} Iwate Prefectural Office

^{F)} Iwate University

Abstract

Construction of the International Linear Collider (ILC) in Japan has been considered. Since a large-scale accelerator such as the ILC is a facility with huge power load, it is important subject to build a sustainable power system in the operation. The electric power supplied to an accelerator is dissipated into the air as thermal energy from the cooling tower at the end. The temperature of the waste heat is usually less than 60 °C and it has not been reused so far. The water vapor adsorption material HASClay composed of nano-sized clay has been recently developed. It has a heat storage capacity with a principle of energy transfer in the desorption of water vapor. It particularly has an excellent storage ability for low-grade heat (<100 °C). In addition, the heat stored can be reused offline by transporting the material with a sealed container. Now it is possible to establish a new heat supplying service if we can recover it by the HASClay from not only the ILC waste, but also various sources in the area around the ILC. In this study, we have developed a new technology to utilize the low-grade heat with a portable container aiming to establish an offline heat transportation system.

1. はじめに

国際リニアコライダー(ILC)は宇宙誕生の謎を探求する大型加速器である。全長 20 km の直線型加速器で電子と陽電子を両端から加速し中央部で衝突させることで、宇宙誕生の謎の解明に最も重要なヒッグス粒子を大量に生成し、それを精密に調べることを目的としている。世界の研究者たちはその立地候補サイトとして北上高地を選択した。最近その実現にとって重要なステップが以下のように進みつつある。

本年 2020 年 2 月と 8 月に ICFA (国際将来加速器委員会) は ILC の準備研究所設立に向けた国際チームを KEK (高エネルギー加速器研究機構) に設置することを発表した。ILC 研究所のような国際機関が我が国に設立されるのは初めてのことである。また本年 6 月に CERN (欧州原子核研究機構) において欧州素粒子物理の長期戦略が公表された [1]。その中で、CERN の将来計画として高性能 LHC (大型ハドロンコライダー) の運転計画 (2038 年頃まで) や将来円形衝突加速器 (FCC; 周長 100 km、100 TeV の陽子・陽子衝突型加速器で 2050 年代半ばの運転開始を目指す) の開発が提言されている。そこで特筆すべきは、ヒッグス粒子の精密測定を目的とした(ヒッグスファクトリー) ILC がタイムリーに建設される

のであれば、それは上記の欧州戦略と適合するものであり、欧州は協働して ILC に取り組むと明記されていることである。ILC が実現すれば FCC の初期段階を電子・陽電子衝突のヒッグスファクトリーにすることを経ずに陽子・陽子衝突に絞ることができる。一方で、日米は既に 2013 年から学・官・産レベルの協議を重ねており、これで日欧米 3 極の戦略の足並みが揃ったことになり、最も早いケースでは 2022 年から ILC 準備研究所が設置される見通しとなった。

以上世界的に高エネルギー物理学の将来について潮流が見えてきたが、その中に本論文にとって重要な項目がある。欧州戦略提言の中には、ILC のような大型研究施設においてはエネルギー、環境に関して持続可能な施設にすることが必要条件とすることが含まれているのである。我々は以前より同様の方針を示しており、2016 年には既に ILC の排熱を回収する研究を提言している [2]。また ILC 関連施設の木造化やエネルギー源として未利用バイオマスの熱利用、太陽熱利用などを取り入れるための多彩な研究を展開しており、それらを総称した Green ILC という活動を推進してきた [3]。Green ILC については、岩手大学・東日本機電開発の共同研究でもこれまで取り組んでおり、2017 年加速器学会年会において、排熱回収技術に関わる研究について報告している [4]。

ILC を電気負荷装置としてみたとき、使用電力はピー

[#] sasaki@kidenkaiatsu.co.jp

クが 120 MW、年間消費電力量は運転時間にもよるが 7 億 kWh 程度となる。粒子加速に供される電気エネルギーは最終的には装置機器内で熱エネルギーに変換され、冷却水システムにより水冷される。冷却水は地上に設置された冷却塔に循環しており、そこで放熱される。放熱される前の温水温度は機器の設計にもよるが、60 °C 程度と想定されている。この排熱の有効利用は Green ILC において重要な課題であり、そこで我々は蓄熱材ハスクレイ(HASClay)を用いた熱の再利用について検討を行っている。

ハスクレイによる排熱吸収、再利用の研究については、高砂熱学工業・産業技術総合研究所(AIST)等による実証試験が先行しており [5]、数トンクラスのハスクレイを使った工場規模の試験が行われている。一方で我々は ILC 立地地域の特徴である人口密度の低い中山間地での応用範囲の拡大を考えることとし、人力で運べる程度の小規模コンテナを用いたシステムの開発を目指すことにした。そのことにより、本技術応用の裾野を広げ、ひいては使い勝手の向上、コストの低減を実現することを目指す。

ハスクレイの蓄熱⇔放熱の原理について、詳しくは文献[5, 6]に譲るが、ここでは概略を説明する。ハスクレイは Fig. 1 に示すように、粒状に成形された粘土系のナノ粒子焼結体で、多孔質で大きな表面積を持っている [5]。これが低湿高温の空気に曝されると、水分を失いドライな状態になる。これが蓄熱過程である(蓄熱量については後述)。逆に高湿低温の空気に曝されると、空気中の水蒸気を表面に吸着(重量が 20~30 %増加する)し、それが発熱反応であるため昇温する。このような性質を踏まえ、実用的にはハスクレイをコンテナに入れ、そこに空気の流れを作って蓄熱または発熱反応が持続的に起こるよう制御することで、熱の回収・利用が可能となる。

日本全国の工場に目を広げると、それらの排熱のうち 70%が 200 °C 未満であり [7]、かつ未利用のまま排出されているのが現状である。つまり、至る所に低品位熱源がありながら、回収とその応用の技術がつかないため無駄に捨てられている。本研究が、これらのエネルギーの循環利用の拡大につながる。



Figure 1: Granularly molded HASClay® sintered body.

2. 岩手県における排熱利用の特徴と課題

ILC の候補地は岩手県の北上高地であり、将来的には岩手県、宮城県にまたがる領域まで拡張される可能性がある。本研究は、ILC 候補サイト地域の特徴を踏まえた排熱回収とそれを利用する事業のモデルを構築することを目的としている。

低品位の排熱源を資源としてみた場合、ILC 以外で

は、岩手県の特徴として大小さまざまな企業の工場が進出しており、それらが熱源となるポテンシャルを持っている。その他に温泉や地熱発電施設なども多くあり、そこから廃棄されている膨大な熱エネルギーもある。

一方岩手県は、県域が広く人口密度のランキングは北海道に次いで低い。しかも中山間地が多く、熱源となり得る排熱施設に隣接した熱利用施設を集積しにくい状況にある。そのため熱エネルギーを、例えば、温水の管路を使ったオンライン輸送でなく、各種車両によるオフライン輸送による循環利用ができることが望ましい。ハスクレイはその条件を満たし得る材料である。

この地域の特徴であり、持続可能なエネルギー循環システムのもう一つの材料として既に運用されているのが木質バイオマスである。木質バイオマスを利用する場合に注意すべき重要事項は、あくまでも「未利用の」木質バイオマスを熱源とすることである。その好例が岩手県久慈市の久慈バイオマスエネルギー株式会社の事業で、ここでは粉碎乾燥させた広葉樹・赤松由来のバークをトラック輸送している [8]。蓄熱したハスクレイも乾燥木質バイオマスチップも、水分を避けておけば蓄熱媒体としての機能は経年劣化しない。その運用形態はハスクレイの利用と共通点があるので、参考にしたい。また将来的に両者のハイブリッドシステムの可能性もあると考えられる。

3. ハスクレイを利用した地域熱エネルギー循環モデル

本研究で用いるハスクレイの仕様上の体積当たりの最大蓄熱密度は 588 kJ/L (リットル) に達するが、a)ハスクレイの製作ロットにより 10~20 %程度は性能に幅があること、b)ハスクレイ粒子の形状や状態、c)容器への充填の仕方、d)容器の形状、の4つの要因により「かさ密度」も変化するので、「体積当たりの蓄熱量」の定義は厳密なものではない。

我々は、エネルギー循環サイクル(蓄熱⇒輸送⇒放熱(熱利用)⇒回収・蓄熱)として次のようなモデルを考えている。

- ① 蓄熱過程: ILC、工場、温泉施設、クリーンセンター等の排熱をハスクレイに蓄熱する。ここでは人力での搬送を念頭に、そこで用いる小型コンテナと、それに蓄熱する機構(装置)を開発する。
- ② 輸送過程: 専用トラックが最も考えやすいが、輸送コストを低減するために利用者が減少している公共交通機関、その他の輸送車両なども活用する。これはモビリティ全般を考える上でも重要な課題であり、多種多様な膨大な数に上る輸送車両の「空車率」を最小化することに繋がる課題である。
- ③ 放熱(熱利用)過程: 本研究の目的は人口密度の低い 1 次産業の活発な地域での応用であるため、利用者へ直接配送するだけでなく、中間倉庫などに一定数を蓄積し、そこにハブ機能を持たせることも考える。後者の場合、利用者はそこから必要に応じて受け取る、というモデルである。熱利用にあたっての要点は「誰でも簡単に使える、という使い勝手」をできるだけ簡便にすることである。そのためには小型コンテナに収めたハスクレイの単価を下げるこ

とは必須であり、それは利用者の裾野を広げることにもつながる。

- ④ 回収過程: 使用後ハスクレイを回収し、再び蓄熱過程に戻すが、ここでは②と同じような方式をとる。

このモデルが実現すれば、全体として環境負荷が低減し、エネルギーの地域内循環が実現できる。

このような将来的な熱循環サイクルを見据えながら、本研究では熱利用方法として、ハスクレイを用いた“農業用ハウスにおける暖房”および“木質チップの乾燥”の二つを想定した試験を行った。

4. 可搬型小型容器による熱利用のための基礎実験

農業用ハウスにおける熱利用を目的として、蓄熱過程の温度条件を 60 °C 程度とした試験を行った。まず、高齢者や女性も利用しやすい、可搬型小型容器を開発し、それにハスクレイを充填する。その重量は蓄熱した状態、即ち水分を失った状態で概ね 10 kg 程度となる。これに湿った空気の導入し放熱させると、重量が 20~30 % 程度増加する。このハスクレイを充填した小型容器モジュールの個数を調整することで、熱利用場所の状況に応じた使用が可能となる。

Figure 2 に蓄熱⇔放熱の基礎試験に用いたハスクレイ小型容器用基礎実験器の構造図を示す。実験器全体は幅、高さともに 4 m、ダクトは内寸 500 mm x 500 mm とし断熱材で覆っている。正面開口部にハスクレイ約 10 kg を充填した樹脂ケース (Fig.3) を挿し込み、蓄熱⇔放熱できる構造とした。実験では正面開口部の上部・下部に温度、湿度センサーを設置し測定し、風量は正面開口部下部に風量計を差し込み測定した。

蓄熱工程では、外部の温水ボイラーからファンコイルユニットに 50 °C 程度の温水を供給して空気加温し、不足分はダクト内に取り付けたヒーターで加温する。放熱工程ではファンコイルユニットを送風機として使用し、ダクト上部に取り付けた加湿器のミストを攪拌しながら高湿度空気をハスクレイに供給する。蓄熱、放熱ともに外気導入かダクト内空気循環の方式を選択可能としている。

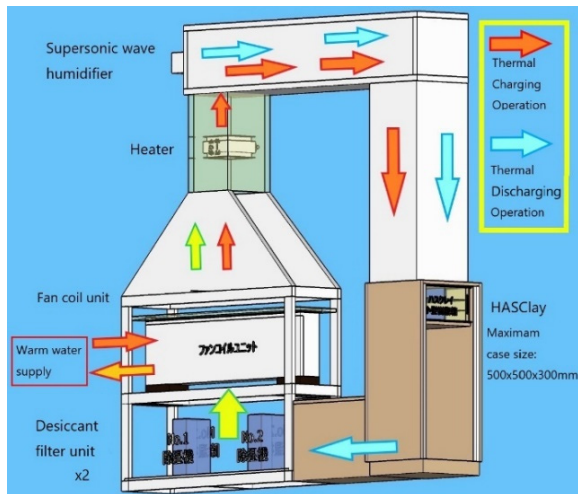
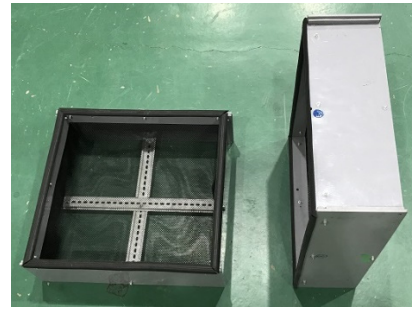
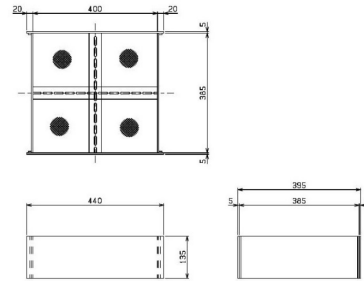


Figure 2: Experimental equipment for thermal charging or discharging.



(a) Portable container for this experiment.



(b) Design drawing of portable container for this experiment.

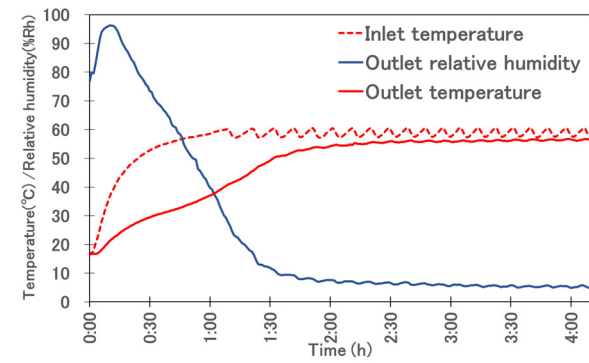
Figure 3: Portable container filled with HASClay®.



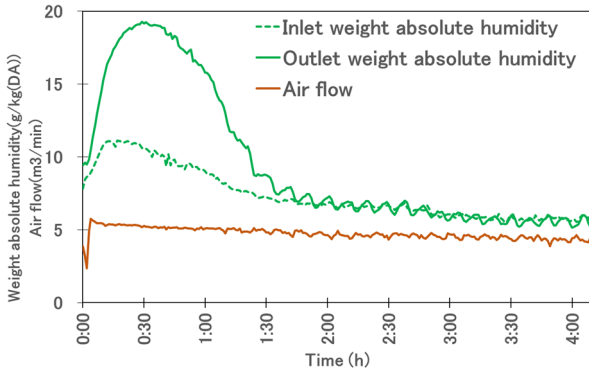
Figure 4: Portable container for field experiment.

Figure 5 に典型的な蓄熱⇔放熱試験の結果を示す。蓄熱過程では、60 °C 乾燥空気導入開始より 3 時間程度で出口温度および絶対湿度が漸近的に一定値に達する (Fig. 5 (a), (b))。一方、放熱過程では、開始から 20 分後、入口温度に対し出口温度が 21 °C 上昇、+5 °C 以上を 3 時間 45 分、+2 °C を下回るまで約 8 時間となる。+2 °C を下回るまでの放熱エネルギーは 10.8 MJ/(ハスクレイ 10 kg) であった。なお、+2 °C 以下になった時点で放熱を停止させた。

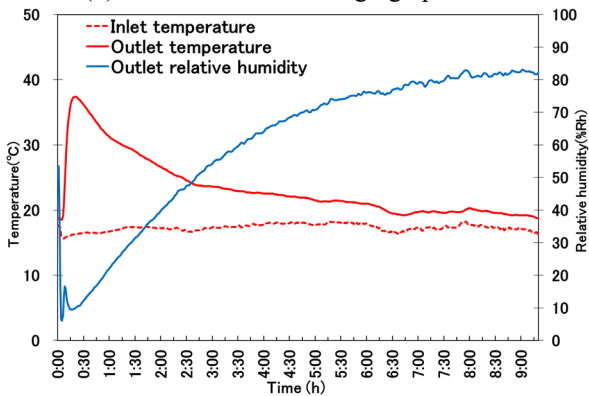
本装置による試験では、当初は装置やハスクレイ容器の性質、性能を把握するまでは安定なハンドリングが実現しなかったが、条件の理解が進むに従い、60 °C の乾燥空気による蓄熱試験、および高湿度空気導入による放熱試験が安定に行えるようになり、他の実験等から予想されていたハスクレイの蓄熱⇔放熱性能をほぼ 100 % 引き出せる装置になった。次のステップとしては、熱源を温泉の源泉とし、熱利用施設を農業ハウスとした場合のフィールド試験に移行する。また、フィールド試験のため



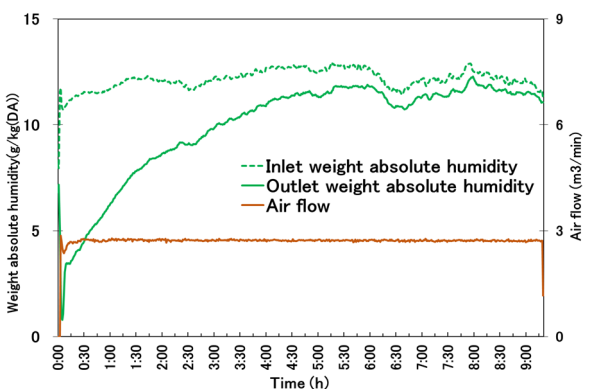
(a) 60 °C Thermal charging operation.



(b) 60 °C Thermal charging operation.



(c) Thermal discharging operation.



(d) Thermal discharging operation.

Figure 5: Typical results of thermal charging or discharging experiment.

に取扱いの容易な容器の開発を行っている(Fig. 4)。

5. 木質チップの乾燥実験

通常、木質チップは雨を凌ぐための天井があるオープンなヤードに積み上げて自然乾燥させ、含水率が 30 % を下回った状態で利用先に搬送するが多い。

今回はそれを模した状況のチップ堆にメッシュ袋に蓄熱したハスクレイを入れたものを混入し、含水率の低下速度を測定した。Figure 6 にその状況の写真を示す。本実験では、チップ 4 kg に対し、メッシュ状の袋に詰めたハスクレイ 1 kg を添加し、含水率の変化を調査した。同時に対照実験としてチップ 4 kg のみで同様の実験を行い両者を比較した。

天井のあるオープンヤードにビニールシートを敷き、メッシュ袋に充填したハスクレイを置き、その上にチップを覆い被せた。対照実験ではチップのみを置いた。試験期間は 12 日間であり、チップを週 5 回攪拌した。攪拌の都度ハスクレイを取り出して、チップを移植ごてで満遍なく混ぜた後、再びハスクレイに覆い被せた。

Figure 7 はハスクレイを入れたチップと対照実験の含水率の時間変化を示す。この結果よりオープンな状況でもハスクレイによる含水率低下速度の促進が見られた。

本実験は極めて単純かつ素朴な試験で木質チップを対象としたが、木質チップに限らず、同様な環境で含水率低下速度を速めたい材料に応用できる可能性がある。



(a) HASClay on wood chips.



(b) HASClay covered with wood chips.

Figure 6: Drying wood chips by HASClay.

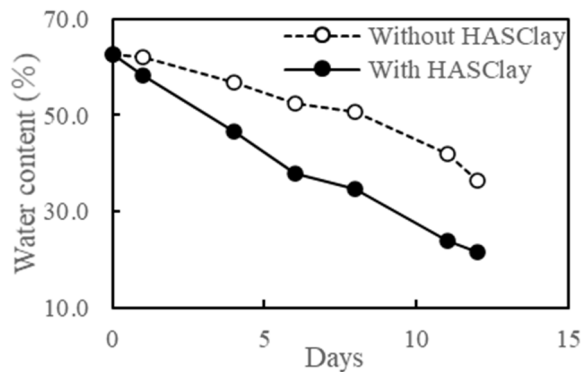


Figure 7: Changes in moisture content of wood chips.

6. まとめおよび今後の展望

小規模なハスクレイコンテナをモジュールとして使った蓄熱⇔放熱試験を行う装置を製作し、ハスクレイの能力をほぼ 100% 発揮できるサイクルを実現することができた。

次のステップとして熱源を温泉の源泉とし、熱利用施設を農業ハウスとした場合のフィールド試験を行う。これにより ILC に先駆けて、岩手県内温泉施設における熱回収実験および岩手県内施設園芸農家における放熱実験の実証を行う予定である。

熱利用施設について、例えば 100 坪の農業ハウスにおいて、上記の小型容器 33.7 個(337 kg)を使用することにより、灯油 1 日分の熱量を賄うことができる。これにより 1 日当たり 10.5 L の灯油を削減できる。このような実証試験を経ながら、蓄熱状態で(乾燥状態)で 10 kg 程度の小型コンテナを開発し、蓄熱箇所⇒物流ハブ⇒熱利用(放熱)⇒蓄熱場所に戻す、というサイクルの確立を目指す。

これと並行して、木質チップのオープンなストックヤードにおける含水率低下時間促進の試験も行い、定量的な評価を行っている。具体的には木質チップ 4 kg に対しハスクレイ 1 kg を埋め込むことで、自然乾燥と比較して乾燥日数を 40% 削減することができた。

これらの研究により、ハスクレイ利用の裾野を広げ、使い勝手のさらなる向上や、コスト削減を可能にしたいと考えている。ILC の運用が始まり、実際に排熱が発生するときまでに技術を確立しておきたい。

また全般的な Green ILC 構想に沿って総合的に取り組むために(一社)AAA(先端加速器科学技術推進協議会)のワーキンググループ、地元企業、熱源となり得る各種施設、基礎自治体等との連携も強めていきたい。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、いわて産学連携推進協議会(リエゾン-I)から支援を頂いた。ここに記して、深く謝意を表すものである。

参考文献

- [1] <http://cds.cern.ch/record/2721370/files/CERN-ESU-015-2020%20Update%20European%20Strategy.pdf>
- [2] J. Sawai, "Energy flow management and utilization of waste heat (Green ILC)", LCWS2016, 4-9 December, 2016,

Morioka;

<https://agenda.linearcollider.org/event/7371/sessions/4351/#20161207>

- [3] M. Yoshioka, T. Kano, S. Narita, H. Odaira, S. Hirai, Y. Kawabata, J. Sawai, "Study on sustainable energy management system in ILC", September 2020, WEPP57.
- [4] 水戸谷剛、吉岡正和、"グリーン ILC を契機とした地域熱エネルギー循環システムの提案"、Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp.1278-1281, 2017.
- [5] 小久保孝、吉岡正和、"吸着蓄熱材技術を活用した ILC の排熱利用の提案"、Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, pp.1273-1277, 2017.
- [6] 鈴木正哉、前田雅喜、犬養恵一、"高性能吸着剤ハスクレイの開発—粘度系ナノ粒子による省エネシステム用吸着剤の開発展開"、産総研学術誌 Synthesiology 第 12 巻第 2 号(2019.8) p.154-164.
- [7] 秋山友宏, Journal of the Japan Institute energy, 86, 101-187(2007).
- [8] 日當和孝(久慈バイオマスエネルギー株式会社)、"木質未利用資源を活用した地域熱供給事業—オンライン供給とオフライン供給"、岩手県庁主催・第 4 回グリーン ILC セミナー、2018 年 2 月 12 日、岩手県産業会館(連絡先:岩手県庁 ILC 推進局)。