

Development of Radiological Educational Program Using a Peltier-Cooling-Type High Performance Cloud Chamber

ペルチェ冷却式高性能霧箱を用いた放射線教育プログラムの開発

Masafumi AKIYOSHI¹, Hirokazu ANDO², Yasuki Okuno², and Hiroto MATSUURA¹

秋吉優史¹、安藤太一²、奥野泰希²、松浦寛人¹

¹Radiation Research Center, Osaka Prefecture Univ. 大阪府立大学・放射線研究センター

²Quantum Rad. Eng., Osaka Prefecture Univ. 大阪府立大学・量子放射線系専攻

Abstract

A Peltier-cooling-type high performance cloud chamber was developed which is very effective equipment for performing radiological education. Observation in a few tens of seconds after a power supply is possible without dry ice, and not only simple observation of alpha-rays track, but also observations of beta-rays track or a delta-rays track arisen from gamma rays are possible. It enables us to perform far deep radiological education. In this paper, the technical features for the hardware of this equipment and the educational program as software using this equipment are introduced.

1. はじめに

各地で行われている放射線に関するオープンスクール活動において、霧箱工作は世代を問わず大変人気があり、目で見て直感的に放射線の存在を知ることが出来るため教育的効果が大変大きく、様々な研究・教育者が霧箱の改良に携わってきた。近年多く行われるようになった工作を中心とせず、測定などを中心とした放射線セミナーなどでも、工作は行わなくても展示物として設置が望まれている。

しかしながら、従来は霧箱の展示を行うためにドライアイスの準備が必要であり、遠隔地でのオープンスクールや、小規模な展示の場合ドライアイスを用意することをためらうことも少なくない。エチレングリコールを用いた高温拡散型の霧箱も販売されているが、電源を投入してから安定して観察できるまで時間がかかり、観察途中の線源の交換などが難しい、大勢の子供が来るオープンスクールではヤケドに対する注意が必要、価格も高価で、展示中のメンテナンスの際に有害なエチレングリコールの蒸気を吸ってしまう可能性があるなどの問題があり、余り推奨できない。さらに、これまで用いられてきた霧箱では、天候などにより飛跡が観察できないことも多かった。また、内容としても「 α 線の飛跡が見えた」に留まっていた。

そこで、簡単に -20°C 以下の低温を得る手段として、ペルチェ素子を使用した高性能霧箱を開発した (<http://bigbird.riast.osakafu-u.ac.jp/~akiyoshi/Works/index.htm#CloudChamber>)。最大の特徴はドライアイスが不要であることに加えて、長時間安定してクリアな飛跡の観察が可能であるため、一般的な霧箱での α 線の飛跡の観察に加えて β 線の飛跡の観察も可能であり、さらには γ 線により放出された光電子なども観察可能なことである。これにより、放射線の種類による物質との相互作用の違いを直感的に学習することが出来るため、ただ単に飛んでいるのが見えた、に留まらない奥が深い放射線の世界を紹介することが可能である。

既に当初の開発から一年以上が経過し、試験的な販売を行いながらの改良を繰り返すことにより十分な耐久性と信頼性を得ることが出来ており、多数の大学や中学校などの教育機関、放射線に関連した研究所などへの導入実績を得るに至っている。本論文に於いて、このペルチェ冷却式高性能霧箱の技術的な情報を公開することで、各地の研究・教育者が自分でペルチェ冷却式霧箱を製作し、よりすぐれた装置の製作、改良が行われることを期待する。

さらに、放射線の種類により生体への影響がどう異なるのか（4000 Bq の K-40 と 20 Bq の Po-210 による実効線量の違い）を実習の結果を交えて説明できる。そのことからベクレルだけでは生体への影響（シーベルト）は評価できないこと、さらに、どういった核種がどのような放射線を出しているかという情報から、身の回りの放射線と福島で放出された核種からの放射線について、同じ土俵で比較する力を付けることが出来るような教育プログラムを作成し、実践を行ったので紹介する。

2. ペルチェ冷却式高性能霧箱の技術的特徴

・ペルチェ素子とヒートシンク

一番の心臓部であるペルチェ素子は、電流を流すと素子の片側から反対側に熱を輸送するという働き（ペルチェ効果）を持つ。熱を輸送する際に仕事をするため素子自体の発熱も伴い、闇雲に電流を流せばよく冷えるというわけではないことに注意する必要がある。TEC1-12708 素子単体を Shuriken Rev.B CPU クーラーに載せて（銀ペーストは後述の MX-4）、アルインコ DM-330MV 安定化電源で入力電圧を変えたときの電流と素子表面の到達温度の関係を図 1 に示す。電流は単純に電圧に比例している。ペルチェ効果による熱輸送量は電流量に比例するが、ジュール発熱量は電流の二乗に比例するため、12 V 程度を境に温度が上昇してきている。ペルチェ素子は様々な業者を通じて広く一般的に販売されている商品であり、40 mm 角の大きさで、結露水に対する防水加工済のものを一枚 800 円以下で入手可能であり（図 2）、TEC1-127xx の型番で消費電力、吸熱能力が異なる様々な製品が販売されている（<http://www.everredronics.com/thermoelectric.TEC1.html>）。

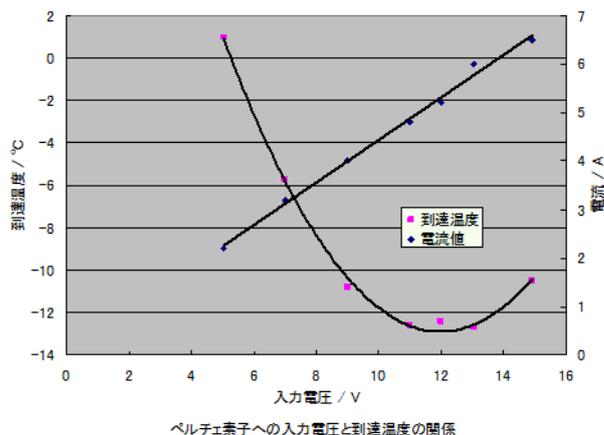


図 1. TEC1-12708 ペルチェ素子単体で入力電圧を変えた際の到達温度 ペルチェ効果による熱輸送は電流に比例するが、ジュール発熱は電流の二乗に比例する。

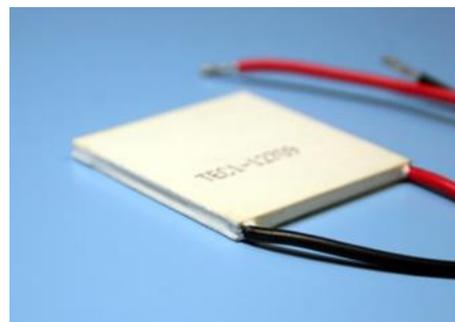


図 2. ペルチェ素子の例 型番の印字面が冷却側である。結露水に対応するため防水処理がされている。

いずれの素子も単体では霧箱として観察可能な -20°C 以下に冷却することは出来ないため、二段重ねのカスケードを形成することで十分な冷却能力を達成する必要がある。一段目と二段目の組み合わせによっては到達可能な温度が異なり、下段の素子に 12 V、上段の素子に 5 V 印加という条件で素子の組み合わせを検証した結果（表 1）、TEC-12705 を上段に、TEC1-12708 を下段に配置すると最も到達温度が低くなることが確認された。

表 1. 上段と下段のペルチェ素子の組み合わせを変えた際の到達温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）の変化
測定時気温は 25°C

		下段(12V)							
		なし	12703	12705	12706	12708	12709	12710	12715
上段 (5V)	なし	25	-13	-15	-14	-15	-10	-9	4
	12703	0	-20	-22	-24	-25	-24	-22	-4
	12705	0	-17	-23	-21	-26	-21	-20	-4
	12706	0	-17	-23	-20	-25	-21	-17	-4
	12708	-2	-12	-19	-17	-23	-17	-12	0
	12709	0	-12	-22	-18	-25	-19	-14	-1
	12710	1	-6	-15	-13	-19	-13	-7	-6
	12715	13							

使用上の注意点としては、 150°C 以上に素子の温度が上がると、内部で素子を固定しているハンダが溶けてしまい、使用不能になってしまうという点が挙げられる。ヒートシンクとの間に異物が挟まるなどして素子背面の冷却が上手くいっていないと簡単に破損するため、到達温度が不十分な場合どちらかの素子が破損していないか確認する必要がある。

ペルチェ素子はあくまでも熱を輸送する素子であり、吸収してしまうわけではないので、必ず高温側の熱を放熱するヒートシンクが必要となり、PC用のCPUクーラーを使用する。現在のCPUは高集積化、高クロック化が進んだ結果、発熱量が非常に上昇しており、最新の製品ではTDP（熱設計電力）が140Wにも達しているため、ヒートパイプを使用した高性能なCPUファンが開発されている。なお、ヒートパイプは開発当初は設置する向きが決められており傾けたり回転したりすると熱輸送を行う事が出来なかったが、現在のCPUファンなどに用いられている製品ではその心配はなく、どの向きでも使用することが可能である。現在販売している霧箱では、Scythe社のShuriken Rev.Bという、トップフロー型であるが十分な性能を持つCPUクーラーを使用している。

CPUクーラー同様に、大きな発熱量を処理するために様々な熱伝導グリスがPC用に市販されている。高性能の熱伝導グリスとして銀の微粒子を使用した製品が数多く売られており、定番と言われているものに、熱伝導率 $9.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ のArctic Silver社のAS-5、熱伝導率 $8.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ のZAWARD社MX-4が挙げられる。MX-4は長期間高温で使用してもグリスのオイルが抜けず硬化しにくいと言われており、現在販売している霧箱ではこのMX-4を使用している。銀以外では、JouJye Computer社のナノ・ダイヤモンドサーマルグリスOC7は、20nmの人工ダイヤを40%使用していると謳っており、 $12.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ に達

する。

なお、ペルチェ素子を二段重ねにして CPU ヘッドに乗せる際に、熱伝導接着剤（ワイドワーク社製 2 剤混合の高熱伝導性シリコン系接着剤 J-Thermo-14C (14 W/m・K) や、Arctic Silver 社の熱伝導製エポキシ接着剤 Thermal Adhesive (7.5 W/m・K) など)を開発の初期に使用していたが、当初は良好な性能を示すものの使用したペルチェ素子が次々と使用不能となる（導通が無くなる）トラブルが多発したため、それ以降使用していない。

・ ATX 電源

ペルチェ素子 2 枚、CPU クーラー、LED ライト、高電圧回路を駆動するために、電源が必要となる。+5 V と、+12 V の二種類の出力を使用する。実験用の安定化電源などを使用しても良いが、一台につき 12 V で 5 A 程度とかなりの容量が必要で高価な電源となるため、PC で使用する ATX 電源を使用する。容量は、一台だけの駆動であれば 150 W 程度、同時に二台並べて使用する場合は 300 W 以上の物を選ぶ必要がある。ペリフェラル 4 ピンコネクタ（大）などと呼ばれる、コマーシャルメイテンロック ソケットハウジング 1-480426-0 (図 3) があれば十分で、最新のマザーボードに対応するためのコネクタなどは一切必要ないため、不要になった古いデスクトップ PC から抜き出して調達が可能である。

なお ATX 電源は PC 用のマザーボードに挿して使用することを前提としているため、そのまま電源を入れても動作しない。そのため、マザーボードに接続する 20 pin もしくは 24 pin のコネクタのうち、緑の線が繋がっている PS_ON を、黒い線が繋がった適当な COM (左右どちらでも良い) に Y 端子などを使用して短絡して単体で動作するようになる必要がある。

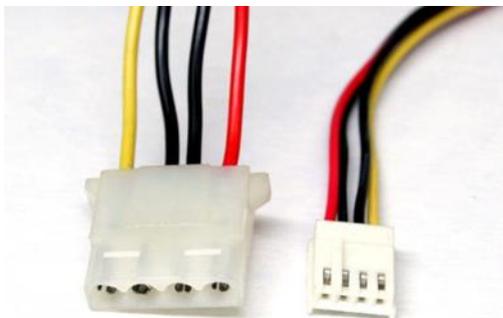


図 3. ペリフェラル 4 ピンコネクタ大 (左) と FDD4 ピンコネクタ (右)



図 4. ダイソーのコレクションケース (ミニ)

・ 観察用チャンバーと LED ライト

観察用のチャンバーとして、ダイソーのコレクションケース (ミニ) が非常に優れている (図 4)。底面が黒色で、9.3 cm 角×高さ 8.7 cm と手頃な大きさであり、LED ライトの貼付けの際に円筒状のケースでは加工が困難であるので四角いケースが望ましく、材質的にもアクリルはアルコールに徐々に侵されてひび割れなどが入ってしまうが、このコレクションケースは台座もフタもポリスチレン製であり全く問題無く使用することが出来る。なお、ペルチェ冷却式の霧箱作成のパーツとしてだけでなく、ドライアイスを用いた従来型の霧箱を作成する際にも、台座が最初から黒く、薄く熱伝導が良いため、スポンジテープ

を付けるだけの短時間の作業で極めて安価で高性能な霧箱が出来るため、最適な選択支と言える。300 円程度のより大型のケースも販売されており、これを用いた大型の展示用の霧箱も実証済である。これらのケースのチャンバーは薄いプラスチックであるため、天板にマントル線源を載せれば α 線は透過せずに、 β 線・ γ 線だけをチャンバー内に入れることが可能であり、特殊な線源無しに β 線観察を可能としている。ガラス製のチャンバーでは不可能であり、大きな特徴となっている。

照明としては、普通の室内程度の明るさでも飛跡を明確に観察可能とするため、電飾用に市販されている 12 V タイプの高輝度 LED モジュールを使用している。現在は SMD 5730 3-LED モジュール (図 5) を使用しているが、抵抗などもモジュールに組み込まれておりそのまま 12 V 電源に繋ぐだけで終端処理等せずに使用することが出来る。



図 5. SMD 5730 3-LED モジュール
20 個単位で入手可能

・ UV レジン

コレクションケースとペルチェ素子の接合には UV レジンを使用している。エポキシ接着剤などでも構わないが、仕上がりの綺麗さと 2 分程度で固まる作業性、接着強度で UV レジンは非常に優れている。通販や手芸店でネイルアート用やアクセサリ製作用などで多数売られている。製品によっては臭いがきつかったり表面がべたついたりするが、硬化後にアルコールで拭き取ることで概ね解決可能である。硬化には日光に当てるか UV ライトを使用するが、LED 式の UV ライトは 375 nm LED を使用していると明記していないと硬化に必要な波長と合わず、多灯式の物でも役に立たないため注意を要する。

UV レジンの硬化は、放射線による重合反応の説明に応用することが出来る。また、紫外線自体も、電波や可視光線から続く光の仲間として、X 線やガンマ線を説明する際に理解の助けとなる。近年 UV レジンを使用したアクセサリ工作は極めて人気が高く、母親層を含めた広い年齢層に対してアピールすることが出来る新しい放射線教育のツールとして現在ソフトウェアを開発中である。

・ 線源

容易に入手できる線源としては、トリウムを含んだランタン用のマントルが最も適しているが、近年ほとんどの製品がトリウムを含んでいない。現在手に入るトリウム含有マントルとして、サウスフィールドブランドの SF-2000 用マントル SF-2000MT と D-X ハイパワーランタン 3000 用の D-X ハイパワーマントルが挙げられる (図 6)。しかし、同社の似たような製品でも SF 200MT や SF-DX400MT という製品は全く放射線を出しておらず、前述の製品も産地によってはトリウムを含んでいないという情報もあるため、返品が可能かなど注意が必要である。なお、元々がキャンプ用品であるため、冬場はほとんど市場に出回っておらず、入手しにくくなるため、夏場に購入しておく必要がある。

次に入手しやすいのは、ラジウムセラミックボール (図 6 下) で 100 g 2000 円程度で入手可能だが、マントルに比べるとやや線量率が低く、丸いボールなので、ワッシャーのような物を

台座にする必要がある。

最も簡単に α 線源を入手するには、空気中のラドン娘核種を掃除機で捕集するのがよい。掃除機は一般的な物で十分であるが、オープンスクールや授業など、限られたスペース、時間で捕集を行う場合は、Electrolux 社製のエルゴスリーマルチフロアという極めて静粛性が高い製品が適している。捕集する際にろ紙のような目の詰まったフィルターを用いると、非常に捕集効率が悪く時間がかかるため、ベンコットなどのようなガーゼを使用するという点に注意する。掃除機の吸い込み口にガーゼを当てて輪ゴムで止め 10 分程度吸引するだけでよい(図 7)。建物の素材(鉄筋コンクリートかどうか)や空調の状況などによって異なるが、地下室などがあればマンツルに匹敵する強度の線源も作成可能である。半減期 40 分程度で減衰するため霧箱工作教室などでの配布の際にも安心である。USB 接続して PC に計数値を取込可能な高感度のパンケーキ型の広窓 GM サーベイメーターである SE International 社製インスペクター USB などの製品を用いれば、授業時間内程度で半減期を明確に評価可能であり、減衰挙動を直接学習することが出来る貴重な線源となる。

・高圧電源

通常の霧箱では、雨天時など α 線の飛跡がよく観察できない事態が頻繁に発生する。これは、空気中の雑イオンが多すぎるため、放射線が通らなくてもアルコールが核生成してしまい過飽和蒸気圧が低下するためである。この雑イオンを、高電圧を印加することで除去する必要がある。

最も簡単には、化学繊維の布などでチャンバーを直接こすることで静電気を発生させるが、飛跡が見えない悪天候時は静電気も発生しにくく、上手くいかないことも多い。小型のバンデグラーフ起電機なども利用可能であるが、長時間の運転には向かず、電圧のコントロールも容易ではない。

そこでコッククロフト・ウォルトン回路(図 8)を用いた高電圧発生装置を利用する。冷陰極管(CCFL)用のインバータ回路(図 9)が安価で入手できるため、これを 1 kV 程度までの交流の高圧電源としてコッククロフト・ウォルトン回路に入れて、昇圧・整流を行う。余り電



図 6. サウスフィールドブランド D-X ハイパワーマンツル(左)と SF-2000MT(右)、ラジウムセラミックボール(下)



図 7. ベンコットと掃除機を用いて空気中のラドントロン娘核種を捕集している様子

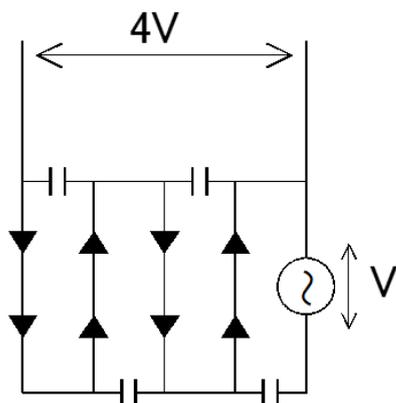


図 8.コッククロフト回路の例
ダイオードを直列に繋いでい
るのは耐圧を上げるため。図で
は4段であるが製品では2段に
留めている。



図 9. 冷陰極管用インバータ回路の例

圧を上げすぎると、逆にイオンを加速して雑イオンを増やしてしまうことが、これまでの研究で明らかになっている。インバータに入れる電圧を 50Ω の半固定抵抗器を用いてコントロールすることで出力電圧を可変としているが、最適な電圧を評価したところ 500 V 程度であった。これは放射線検出器の電離箱領域上限に相当し、それ以上になると比例計数領域から GM 領域となることから、印加電圧の妥当性が説明される。ただし、今後より適切な電極形状などの検討を行う必要があり、より厳しい条件でのクリアな観察を可能とすることを目指す。

・素子表面の塗装

霧箱中のペルチェ素子表面は観察しやすくするために黒く塗る必要があるが、室温から -40°C 以下への温度変化を繰り返し受け、さらにアルコールに曝され続けるため、その双方に耐えうる塗装は非常に困難である。当初はアサヒペンの高耐久性ラッカーズプレーを使用していたが、エタノールに徐々に侵されたため、同じくアサヒペンの弱溶剤 2 液ウレタンスプレーに変更した。塗膜は非常に強靱であり、イソプロパノールにも全く侵されなかったが、温度変化によりひび割れ・素子表面からの剥離が発生した。このため素子表面をシリコンオフ（ヘプタンが主成分）でしっかりと脱脂し、密着性の良いプライマー剤を塗布した後に弱溶剤 2 液ウレタンスプレーを使用することで、温度変化にも溶剤にも強い塗膜を得ることが出来た。2 液ウレタンスプレーは 1 回使い切りであり、補修なども困難なため、一般向けには車の補修用のタッチペンなどが手頃である。

3. ペルチェ冷却式高性能霧箱を用いた放射線教育プログラム

2016/8/18 に福井県立若狭高校から、および 2016/12/13、15 には京都府立桃山高校から、大阪府立大学放射線研究センターへの訪問研修があり、ペルチェ冷却式高性能霧箱を用いた放射線観察実習を行ったので、その内容を以下に紹介する。

・熱電対を用いたペルチェ素子表面温度の測定

熱電対式のデジタル温度計により霧箱表面温度（-30℃程度）を測定する。熱電対とは、温度差があると電流が流れる、ゼーベック効果を利用しているが、ペルチェ素子は逆に電流を流すと温度差が発生する、吸熱している訳ではなく熱を裏面に輸送している事などを説明する。点接触では正確な温度測定は出来ず、アルミテープでしっかりと熱接触を取って測定する事に注意する。

・空の霧箱とポリパックに入れたマントル線源を入れた霧箱の観察

スポンジテープヘエタノール（イソプロパノール入りの安価な消毒液で構わない）を注入して線源を入れずにチャンバーを閉じ電源を入れる。ペルチェ素子によりアルコールの蒸気が冷やされ過飽和となり、空気中の雑イオンなどにアルコール分子が集まって核生成してうっすらと霧状の液滴が漂っていることを観察する。もう一つのチャンバー中にはポリパックに入れたマントル線源を入れておき、ビニール一枚で α 線は遮蔽されていることを確認する。また、いずれのチャンバー中でもよく観察を続けると空気中のラドンなどからの α 線や、バックグラウンドの β 線などが観察される。

・ポリパックから取り出したマントル線源を入れた霧箱での α 線の観察

一般的な霧箱観察同様に、マントルからの α 線の飛跡を観察する。飛行機雲と同じく、粒子自体は見えなくても飛跡が見えている（原子の小ささを説明する）、空気中での飛程はせいぜい数 cm だが、はっきりと直線的に飛ぶことから、後述する β 線に比べ α 粒子はずっと重たく、空気との相互作用によるイオンの生成も激しいことを説明する。なお、線源からの α 線は上下方向にも飛んでいるが、過飽和層が層状になっているため水平方向に飛んだ α 線だけが観測できている。

・空の霧箱の上にマントル線源を置いての β 線の観察

α 線はチャンバー天板のプラスチック板を透過できないが、 β 線は薄いプラスチック板程度は透過できる上に、非常に軽く散乱されやすいので、上から入射しても空気や素子表面で散乱されて素子に平行に走る電子線が観察できる。相互作用は α 線よりもずっと小さくうっすらとしか観察されない、平行に走っている間にも散乱されて糸くずのように曲がりくねる、と言う点に注意して観察する。

・空の霧箱とマントルの間にアルミ板を載せての γ 線（からの光電子など）の観察

ウラン系列核種からの β 線のアルミ中での最大飛程は、Bi-214 からの 3.27 MeV の β 線による 6.1 mm であるため、6 mm のアルミ板をマントル線源とチャンバー天板の間に入れて β 線を遮蔽し、 γ 線のみをチャンバー内に入射する。すると、非常にイベント数は落ちるが、 γ 線によって放出された光電子などが電離作用を示す、 δ 線が観察される。見た目は β 線と同様であり、 γ 線が最終的には β 線と同じような作用を示すことが分かる。

・ α 線、 β 線、 γ 線の物質との相互作用との違いと、生体影響の違いを説明

α 線、 β 線、 γ 線それぞれ物質との相互作用が異なり、それによって霧箱での見え方が異なる。紙一枚で遮蔽されてしまう α 線は、実は短い距離で強烈な相互作用をしており、内部被ばくを考えると非常に危険。透過力の強い γ 線は逆に体をほとんど素通りしており、時々 δ 線を出して β 線と同じような作用をする、などが理解できる。このことから何発出

たかのベクレルだけでは生体影響は評価できず、 $\alpha\beta\gamma$ の種類の違いやエネルギーの違いも考えなくてはならないこと、それによってたった 20 Bq の Po-210 が年間 800 μSv の実効線量を与えるのに対して、4000 Bq の K-40 は年間 170 μSv にしかならない訳が説明できる。

4. 結言

放射線教育を行う場で極めて有効な装置であるペルチェ冷却式高性能霧箱の開発を行い、ハードウェアとしての技術的特徴と、それを用いたソフトウェアとしての教育プログラムを紹介した。販売されている製品のユーザーのみならず、これから開発を行う研究・教育者にとって、製作・運用上の参考となれば幸いである。

運用を行う上で、ガストープを使用している部屋では観察が非常に困難であるという情報をユーザーから得ているが、実際にその通りであった。様々な環境の現場での使用報告は非常に参考となり、今後の開発の助けとなるため、ユーザー間の ML を作成して情報交換を行い、より確実な観察を可能とするよう、ハード面と運用面からの改良を、また様々な層の受講者に対してより効果的な学習が出来るよう教育プログラムの開発を行っていく予定である。

また、低予算で授業を行う小・中学校の教育現場に必要なハードウェアを供給できるよう、ふるさと納税制度を用いた大阪府立大学つばさ基金でのプロジェクトを立ち上げている。大阪府立大学は公立学校という特殊な立場であるため、この制度が利用可能であり、既に数件の受入と僻地や福島の中学校への霧箱提供の実績がある。今後全国的にこの仕組みを活用したシステムを展開できないか検討を行う予定である。