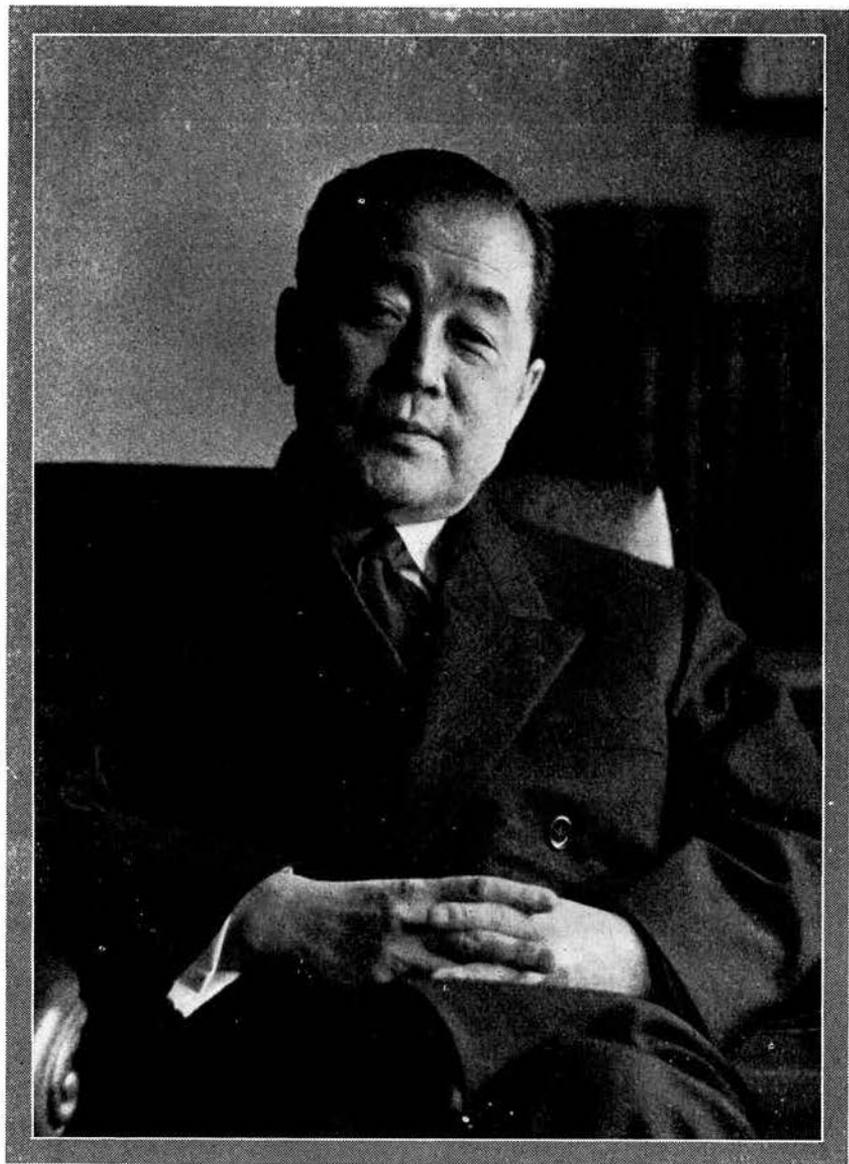


昭和 30 年仁科記念財團の創立以來，理事長として當財團のため内に外に格別の御盡すいをいただいた銚澤敬三氏は昭和 38 年 10 月 25 日逝去されました。ここに謹んで哀悼の意を表します。



■上, クライン博士を囲んで…(昭和31年)

■下左, 第1回講演会々場控室にて…(昭和30年)

■下右, 江崎, 中根両氏に仁科賞を差上げる
洪沢理事長
(昭和34年)



電子冷凍の理論と応用

地方講演会：1959年9月23日札幌商工会議所大講堂において
第5回定例講演会：1959年12月7日国際電電ホールにおいて*

東京大学工学部教授** 菅 義 夫



はじめに

ただいま、ご紹介にあずかりました菅^{すが}でございます。

仁科先生の記念の講演会に話をするようにとのことでしたが、もともと私、仁科先生のように核物理と申しますか原子物理と申しますか、そういった方面に興味を持っているものではなく、むしろ物理学の応用というようなものに興味をしておりますものがあります。お引受けするのもいかがとも思っただのですが、仁科財団の方のお話によりますと、原子物理およびその応用というのが財団

のお仕事のひとつのねらいであるとのこととでございますので、大変名誉なことでありお引受けしたわけでございます。

それで今日お話いたしますのは、私ども半導体の応用というようなことに興味をしておりますので、その半導体の応用のうち私のところで手がけまして、ある程度、成果が得られてまいりました問題について、申し上げることにいたします。表題に「電子冷凍の理論と応用」という名前をつけてございますが、「電子冷凍」という言葉は、ロシアにヨッフエという偉い半導体の研究者がおりまして、その人の書かれた通俗的なものが入ってきて、それに「電子冷凍」というようなことばが使ってあったものでございますから、それを使ってみたわけです。ところが、なんと

* ほぼ同じ内容の講演が地方講演会と第5回定例講演会とで行われた。この記録は、地方講演会における録音による。このページの写真は定例講演会における講演者。

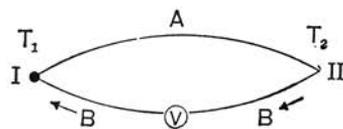
** 現在、上智大学理工学部教授、理化学研究所招へん研究員。

なくジャーナリスティックな匂いが濃厚ですので電子冷凍という妙な言葉がどちらかと申しますとかなり早くはやってしまったわけでございます。内容は、いまこれからお話いたしますように、電流を流すと——電流とはご承知のように電子の動きと申しますか移動でございますから、結局、電流が流れて——それで温度が下るといようなことでもあります。そういう働きをするのは、電子 (electron) が移動するのである、という考え方です。ちょうど冷凍機では、アンモニアとか、あるいはフロンとか、そのようなガスが膨脹したり圧縮されたりするさいに、吸熱もしくは発熱が起こる、そういうことを利用して、低い温度を作っているわけです。いわば、物理の方で申しますところの作業物質——働きをする物質というのは、ふつうの冷凍機でありますと、フロンなり、アンモニアなり、あるいはメチルクロライドといったようなものがありますが、これからお話するような原理でもし低い温度ができるといたしますと、それは電流が働きをするので、すなわち電子の移動が働きをする、結局、電子が作業物質だといような考え方から、電子冷凍といような言葉でいわれているわけでございます。

これからお話いたしますように、利用するのは熱電気でございます。したがって物理学の書物では、「熱電冷却」という言葉を使う方が正しいと思いますし、ドイツでもイギリスでもフランスでも、アメリカでも大体物理学の書物では熱電冷却に相当する言葉を使っているようでございます。それで今晚お集りいただいているかたの中には、物理の先生方もおいででございますし、お見うけいたしますと若いお嬢さん方もおいでございまして、どういう方を対象にお話してよいのかちょっと私、とまどいますので、専門の先生方には多少ご迷惑かも知れませんが、やや初歩的なこともあわせて少し申し上げます。

ペルチエ
効果とは

図に書いてございますように、たとえば A という金属と B という金属をつないでおきまして、たとえばその一方のつぎ目 I が、もう一つのつぎ目 II より温度が高い



第1図 2種の金属を二つの点でつないだとき両点の温度が等しくないと両点の間に電圧を生じる

といたしますと、起電力がでてくる。つまりもし、I, II の間にボルト・メーターをつないで置いてやりますと、なにがしかの電圧が生じているということ、1822年に、ゼーベック (Seebeck) という人が発見しております。これは、実は皆様よくご承知の熱電対という言葉でよばれておまして、これを利用して、ここにできた電圧をよみまして、例えば II を水の氷点温度にしておく、そして電圧をよみますと I が何度になっているかということがわかるので、これは温度計によく利用されているわけでございます。

1834年にペルチエ (Peltier) ——この人はフランスの時計の技師だそうでございますが——その人が今度はこんな現象を見出しております。それは、二種類の金属の針金、例えばここにビスマス (蒼鉛 Bi) という金属の針金があり、またアンチモン (Sb) という金属の針金がありますが、これをつなぎまして、これに直流電流を流してやります。つまり直流電源のバッテリーにつないでやまして、電流を流してやります。そして例えば図のように流れる (第2図) ビスマスからアンチモンへ電流が流れるとしますと、このつぎ目のところの温度が低くなってきて、他方のつぎ目の



第2図 ビスマスとアンチモンによる熱電素子

温度が高くなってくる、こんな様なことを見出しております。これはペルチエが見出したものですからペルチエの効果という名前によばれておまして、これからお話いたしますことからは、ほとんどすべてこのペルチエ効果の周囲をうろつくということになります。第2図では左のほうにさっき申しましたビスマスという名が書いてございます、右のほうはアンチモン。こんな風につないでおいたといたしまして、ビスマスからアンチモンの向きに電流を流してやります。そうしますと、このつぎ目の所で温度が下ってくる。それからもうすこし変えまして、ビスマスとアンチモンとの間を銅の板でつないでおきます。そして電流を流してやりますと、このところが冷えて、このつぎ目のところが熱くなる。こういうことでございます。それで、その時に、このところで熱をどれ位まわりからとるであろうかということでございますが、それはい

ろいろな人がいままで、たくさん勉強しておりまして、その結果は、 Q カロリーの熱をまわりからとると致しますと

$$Q = \alpha_{AB} IT$$

で、流す電流 I に比例する (5 アンペアより 10 アンペアの方が倍つめたくなる)。それからこの実験をやっております時の平均の温度、それを絶対温度であらわしたものを T としますと T に比例します。例えばいま気温が $26^\circ \sim 27^\circ$ くらいだと思いますが、そうしますと絶対温度でいい表わしますと 300° 位です。更にここで α_{AB} と書きましたのは、先程のアンチモンとビスマスとで熱電対を作ってみますと、その時ボルトメーターで電圧がでると申しましたが、でてくる電圧を 1° あたりになおした時にどれ位の値になるかという、熱電気の係数とよばれるものです。これは A という物質と B という物質が何であるかによってちがうものですが、AB の組み合わせによるという意味で A と B とを書いたわけです。そうしますと、こういうところで冷えるためには電流がたくさん流れた方がよい、それからそういうことをやるのに、どちらかというより余り温度は低くない方がとくである。

それから熱電能の大きいような物質の組み合わせをさがせばよい、こういうことになります。しかし話はもう少し複雑でございます。

電子冷凍の メカニズム

なぜ冷えるか、ということ
はちょっと申し上げておいた方がよいかと思ひます。

だいたいのことを申しますと、電子がビスマスのような結晶の中で持っている位置のエネルギーは割合に高いのでございまして、仮りに、こんなところにあるといたします (第 3 図)。高さで、位置のエネルギーの多い少な



第 3 図 アンチモンとビスマスの中における電子の位置のエネルギー

いを仮りに表わすといたします。それからアンチモンの中では電子の位置のエネルギーは割合に低いのです。そうしますと電子を低い

エネルギーの状態から、高いエネルギーの状態にもってゆくには、外から何か仕事をしてやらねばならないことになります。だから電子をアンチモンからビスマスにもってゆくには外からエネルギーを与えてやる、もし外からそれを与えてやらなければ、自分自身のエネルギーを食ってゆくことになります。そこで、電子が Sb から Bi へというわけですから、電流は、Bi から Sb へということになります。電子はマイナスの電荷をもっているからです。すなわち電流が Bi から Sb へ流れるためには周りからエネルギーをもらわなければならない。そこで、そのエネルギーは自分の格子振動——結晶格子はある温度でいろいろに振動しているわけですが——この振動のエネルギーを使って電子が低い状態から高い状態へゆく、そのために温度が下ってゆくということになります。もう少しついでに申し上げておきますが、こんな様な、位置のエネルギーのちがいは、温度でもちろん違って来るわけです。それから同じビスマスといたしましても、もし何かのチャンスで、多少不純物が入っておりますと、この位置のエネルギーは変わってまいります。例えば、電子を余計もっているような不純物でありま

すと、いわば電子は仲間がいましてお互にはね合う——少し怪しげな言いかたになりますが——仲間がたくさんいますと、いわば居心地が悪くなりまして、位置のエネルギーの高い状態になります。それから、そうでなしにもし電子と逆の符号^{サイン}をもっているもの、例えば電子のぬけがらのようなものがあるといたしますと、やや安定な状態に近いことになりますから、そこで位置のエネルギーは低いことになります。したがってこういうものが純粹である時と不純物を入れた時とでは、この位置のエネルギーの高さが違ってまいります。後で私どもがいろいろ不純物をわざと入れるというようなことを申しますが、それは要するにこういう位置のエネルギーの高さを人為的に変えて都合のいいようにしてやろうという気持ちが入っておるわけですが。

電子冷凍の邪魔 をするもの

それで、電流は多く流れた方がよい、温度は余り低い、それから熱電気の係数はなるべく大きいものをさがしてきた方がよい、こういうことなのですが、実際こういうものに電流が流れたといたしますと、必ずジュール熱がでてきます。電気抵抗がありますから必ずジュール熱が現われてきます。

それから仮りに一方の温度が低くなって、他方の温度が低くないといたしますと、その間に温度差がありますから、熱は高い方から低い方へ流れるわけでございます。そうしますと、つぎ目に着目いたしますと、ジュール熱で出たのもここへやってくるし、伝導で伝わる熱もここへやってくる。それから、他方ではペルチエの効果で冷えるということになりますから、ペルチエの熱が仮りにかせぎ手だといたしますと、かせぎ手がひとりで、ここに金を浪費するものがいろいろでてくるわけです。熱を外からもってくる、もってくる方を浪費とは変な話かもしれませんが温める方の役目をするものが、熱伝導によるものと、それからジュール熱によるものがあります。ただジュール熱によって出てきたものが全部ここに来るかどうかは判りませんので、そのうちの一部分がここにやってくる、という考え方をいたします。それで、あと簡単な計算をするわけですが、その計算の結果、出たジュール熱の半分がここへやってくるのだということがわかっております。それで今度はこれがペルチエの熱といたします。そうしますとこれがかせぎ手で、これとこれが浪費者、かせぎ高から浪費を差し引いた残りがあれ

ば、——収入の方が使う方より大きければ——若干冷たくなる。ところが、ペルチエの熱よりも、ジュール熱と熱伝導を加えたものが大きければ、いくらそんなことをやっても冷えないということになります。そこで熱伝導の熱とジュール熱の熱をペルチエの熱と差引きしたものがなにがしかあるとしまして、これを Q としますと、それが、ちょうどこのところでバランスしている。もしこのペルチエの熱——マイナスのものがうんと働いておれば、まわりからここに向って熱が流れてくる。熱が入ってくることになりますから、付近が冷えるということになります。それで後は簡単な計算でありまして、例えば、熱伝導であるなら A という物質の熱伝導度 λ_A 、切口の面積 S_A 、それから温度差 $T_1 - T_2$ 、それから長さ l_A がどれ位あるか、で決まります。 B の方についても同様です。それからジュール熱の方は電流の 2 乗に比例して、あとは抵抗をかければいいわけですから、電気伝導度を σ という文字であらわしますと、入ってくる熱は式 (1) のようになります。

$$(1) \quad Q_1 = \lambda_A \frac{T_1 - T_2}{l_A} S_A + \lambda_B \frac{T_1 - T_2}{l_B} S_B$$

$$+\frac{I^2}{2}\left(\frac{l_A}{\sigma_A S_A}+\frac{l_B}{\sigma_B S_B}\right)$$

A という方の物質のところで出る熱、B の物質で出る熱の両方合わせますとこんな風になります。それからペルチエの熱は、先程申しましたように、この場合こちらはマイナスにして使おう、つまり冷えるようにしようというのだからマイナスですが、そういうものをそれぞれこの中に入れて、勘定をすると式 (2) のようになります。

$$(2) \quad -Q=Q_1-\alpha_{AB}IT_2$$

われわれのねらっておるのは、この Q を大きくすることなのです。これが一番大きくなるためには、どんな条件を満足したらいいだろうかというので簡単な計算をいたします。そうしますとこういうものの中にひとつの条件がでてまいりまして、その条件というのは式 (3) で表わされます。

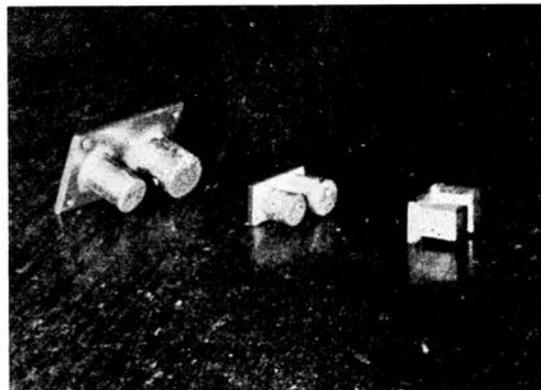
$$(3) \quad l_A S_B / l_B S_A = \sqrt{\sigma_A \lambda_A / \sigma_B \lambda_B}$$

左辺は寸法でできる量ですが、右辺は A という物質の熱伝導度と電気伝導度の積を B という物質の同じような量で割ったものの平方根、こういう条件を満足してくれると Q が

一番大きくなるということになります。そこで、仮りにこの絵のように長さを同じにしてみますと、この条件は S_A/S_B が 2 つの物質の熱伝導度とか電気伝導度とかいったものの積の比をとり、その平方根をつくったものになっていなければならないということになりますから、長さを仮りに等しくしてやりますと、この切口の面積は、これらの物理的性質によって寸法がきまってくることになります。

「効率」を最大にするには

遠い方にはごらんになりにくいかと思いますが、ここに私どもが初期の時代にや



第 4 図

りましたひとつのサンプルを持ってきております。長さを等しくいたしますと性質で太さをかえなければいけないということになります。

す。こんなふうにはいたしませんと、ここの所へ出てくる熱を最大に利用することがうまくまいりません。そこでいま仮りに熱伝導度とか電気伝導度を測りまして、そういうものの勘定から切口の面積をかえて、こんなものにしたといたします。そこで今度は、そういう Q という熱がえられたわけですが、 Q という熱を得るためには I という電流、何アンペアかの電流を流しているわけです。この両端に電圧をかけまして、何々アンペアという電流が流れるわけでございます。そうしますとある電圧で電流を流してやりますからここに何々ワットという仕事をしてやることになります。そこでそれだけの仕事をして、要するに資本をつぎこんでやって、その結果どれ位熱が得られたかということになりました、いわば、これはひとつのこういう系(system)の効率(efficiency)みたいなものになります。仕事をしてやっただれ位熱が利用できたかということになりますから。その効率みたいなものを仮りに ϕ (ファイ)と書いてみます。それはこの両端に電圧をかけて、電流を流しますと、始めは温度差がないわけですが、温度差のない時にここに掛けてやりました電圧によってその値が変わってまいります。か

りに、掛けてやりました電圧を P_0 としておきますが、 ϕ は P_0 の函数としてその値が変わってまいります。それでわれわれが仕事をする場合には、こういう効率に相当するものが一番大きくなるようにしたい、ということになりまして、これが一番大きくなるようにするのでまた計算をいたします。そうしますと、ちょっと複雑な形になってまいりますが、こういう条件の時には ϕ というものは式(4)のような値になってまいります。

$$(4) \quad \phi_{\max} = \frac{T_2 \sqrt{1+\theta^2} - T_1}{(T_1 - T_2) [1 + \sqrt{1+\theta^2}]}$$

例えば始め T_1 という温度からスタートいたしまして、 T_2 という温度まで下ったといたしますと、それに $\sqrt{1+\theta^2}$ が入って来ます。

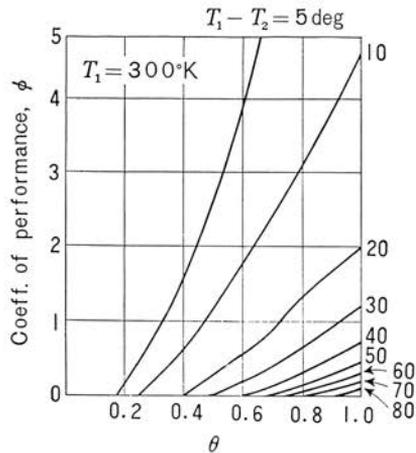
分母も同じような形になり、ここで θ (シータ)というのは計算の便宜上こんなものを書いたのですが、その内容は、A という物質と B という物質を組み合わせたとき考えたときの熱電気の係数 α_{AB} と熱伝導度で決まってきた、式(5)のように書けます。

$$(5) \quad \theta = \frac{\alpha_{AB}}{\sqrt{\frac{\lambda_A}{\sigma_A} + \frac{\lambda_B}{\sigma_B}}} \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right)^{1/2}$$

こんなものを仮りに θ と書いておきますと、
効率の最大値は (4) 式で与えられることにな
るのです。

“シータ”の値は
なるべく大きく
それでいま例えば T_1 を
常温からスタートして、
仮りに T_2 を常温から 5°

下った、あるいは 10° 下った、あるいは 15°
下ったとしますと、(4)の式で T_1 と T_2 がわ
かりますから θ と ϕ の関係がわかることにな
ります。それを図にしましたものが第5図で



第5図 効率に相当するものと
“シータ”との関係

ございまして、効率に相当するものを縦にとり、
そして横軸に θ という量が書いてありま
す。ここでは θ の値は1までしか書いてあり

ませんが、 θ の値は物質の性質できまってくる
量でありますので、これから先もっと大き
くてもかまわないのです。別にここで境があ
るというものではありません。この式を見て
いただきますとすぐわかることですが、 T_1 と
 T_2 が余り違わないといたしますと、分母に
割合小さな量が入ってくることになりま
すから、 ϕ の値が大きくなります。ところが、高
い温度からずっと低い温度まで下げて欲しい
というようなことになると、この値が大
きくなってまいりますから全体として勘定
してみるとわかりますが、 ϕ の値が小さくなり
ます。したがって同じ物質を使いましても、
効率が大幅違うのであります。例えばこの辺
をとってみましょう。 θ の値で 0.6 という
ところをとって考えてみますと、 T_1 を常温
 300°K といたしまして、 5° 位温度が下れば
いいのだということになりますと、効率は
 380% になります。ところが 10° 温度差が必
要だということになりますと、 170% 位に落
ちますし、 20° 程温度を下げて欲しいとい
うことになると、 60% 位に下ります。 30°
ということになりますと、 20% になります
し、 40° 下げてくれということであると、ほと
んど 0% ということになります。したがって

温度差を余り慾ばると効率は落ちてきます。ここで効率という言葉は、熱力学でいう効率とはちがひまして、局部的に目をつけておりますので、見かけ上 100% という大きい効率が書いてありますが、これはふつうの冷蔵庫なんかと全く同じでございます。例えば、ご承知のようにふつうの圧縮機を使った冷蔵庫あるいは冷凍機のようなものでありますと、見かけ上の効率は水冷にいたしますと 300% 位になります。しかしそれは片側で発熱して部屋を温めているなどということとはおかまいなしに、冷蔵庫内だけに注目すれば、そういう見かけ上の効率がでてくる。そんなに効率がいいからというので、座敷の真中に冷蔵庫を置きまして、そしてふたをあけておきますと、部屋は決して冷えません。かえって温まります。というのは、熱力学的に全体のシステムを考えますれば、必ず損失があるわけですから効率は若干 1 より小さくなる。ですから全体としては決して冷えないで、あたたまるわけです。いまこの場合でも、ここだけに目をつけておりました他方での発熱は一応目をつぶっておりますので、一寸効率が数 100% という奇妙な表現になりますが、いまのような考え方をするからでございます。そ

して、お判りになりますように θ の値が大きい方へいった方が得なわけでございます。またこの式からみても θ の大きい方がいいのだということが判ります。それでもういっぺん θ というのは何だろうかということを見ますと、結局、熱電能が大きい方が得だ、それから熱伝導度は小さい方が、電気伝導度は大きい方が得だということになります。温度はそのままにしておいて、したがって θ を、こういう取り扱いの時のひとつの目安にするわけですが、 θ というものを大ざっぱに見当をつけますと、温度のことはぬきにして、A という物質と B という物質は大抵の場合に、それ程性質が著しく違っているということはないのでして、かなり似ております。しかもいまのここでお話しております極めて大ざっぱな計算では細かいことはぬいてあるわけです。例えば、こういうところにおける接触のために出てくる抵抗などは全然考えておりませんし、それから温度差のあるときに、電流が流れているのでトムソン (Thomson) 効果と呼ばれるものもでてくるはずですが、そういうものを一応度外視しております。だから極めて大ざっぱな近似です。そういう意味で、この物質の電気伝導度と熱伝導度との比は、

かなりもう一つの物質のそれに似ているという、やはり近似的な考え方をいたしますと、このところを書いてありますように

$$(6) \quad \theta^2 \sim \alpha^2 \sigma / \lambda \quad \text{あるいは} \quad \alpha^2 / \rho \lambda$$

(電気抵抗率 ρ は電気伝導度 σ の逆数) を一番簡単な場合には目安にすることができま
す。しかし、これでは余り話がだざっばすぎるからというので、例えばソビエトあたりではこれと少し違ひまして (7) 式

$$(7) \quad Z_{AB} = \frac{(\alpha_A - \alpha_B)^2}{\left(\sqrt{\frac{\lambda_A}{\sigma_A}} + \sqrt{\frac{\lambda_B}{\sigma_B}} \right)^2}$$

をとります。ここに $\alpha_A - \alpha_B$ と書きましたのは、結局 A という物質と B という物質の熱電能の差、先程 α_{AB} と書いたものと同じものなのですが、考えとしまして、例えば銅とか白金を基準にしまして、これを仮りに 0 としまして、これより高い熱電能をもっている物質とこれより低い熱電能をもっている物質とを組み合わせるわけです。そうしますとかりに一方を α_A とし他方を α_B としますと、 $\alpha_A - \alpha_B$ でその違いが出る、それでこんな書き方をしたわけです。これは何もこんなふう

に書くまでも α_{AB} で結構です。ソビエトおよび近頃各国ともソビエト流の表現、Z という文字を使いまして、Z がいくつだというようなことで、だいたい物質のよさといひますか、こういうものに対してうまくゆきそうか、ゆきそうでないかの目安にとっているようであります。いずれにしましても θ の値が大きくなれば、大変仕事がやりよくなるわけでございまして、私どもは一応 θ という文字で今日の話を終りまで申し上げることにいたします。そういう目的で何か一組の物質がえられたといたしますと、 θ は両方の物質の熱伝導度とか電気伝導度などで決まってくる量ですから、 θ という横軸の量は決まってしまうわけです。

どこまで低温
にできるか

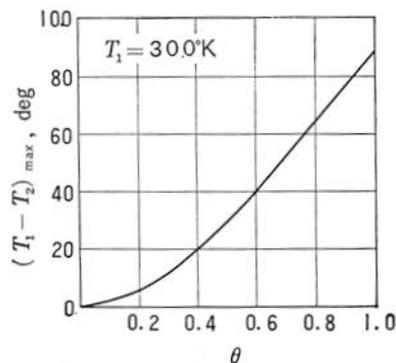
ところで、こういうものを使いまして非常にうまい実験をやったときに、どこまで温度が下るだろうか、ということを考えてみます。効率などは考えずに、一番低い温度はどこまでえられるだろうかということを考えてみます。それは、式からすぐ判ります。一番低い温度になると、そこでは効率が 0 になります。ちょっと変に聞こえるかも知れませんが、もし周囲からここへ若干の熱が入っ

てきたといたしますと、これは入ってこない時より温度は上ってしまうことになります。ですから一番温度が低いということはまわりから熱が入ってこない、すなわち $Q=0$ の場合に相当します。したがって $\phi=0$ ですから、簡単な関係 (8)

$$(8) \quad T_1/T_2 = \sqrt{1+\theta^2}$$

で表わされることになります。やはり、こういう装置を使って温度を下げる場合、どこまで温度が下るだろうかということは、私どもも興味がありますし、お聞きになっている皆さんも多分興味をお持ちだと思うのですが、これでも、 θ の値が大きくなってくると最初の温度と最後の温度の比が大きくなるわけでありまして、大分冷えたということになるわけです。例えば、銅-コンスタントンのようなものと、 α は 1° の温度差に対して $40 \mu\text{V}$ 位になりますが、それで計算いたしますと大分小さい方によってしまいましたうまくゆきそうもない。それから、ビスマスとアンチモンの組み合わせというのは、かなり昔から多くの研究者が興味をもって扱った物質であります。これなんかでやりましたも $\theta \sim 0.6$ でしょう。近頃あちこちでいろ

いろやっております。私達の知りうるかぎり、だいたい $\theta \cong 0.8$ というところで各国の仕事が壁にぶつかっているようです。従いまして、このグラフに書いてみますと、こんな風になって (第6図) 2次曲線のように上に曲ってゆきますが、先程申しました $\theta=0.8$ としますと、ほぼ 65° 位下る位のところでいまのところは止まっているのじゃないかと思えます。しかし先程申しましたように、この先が原理的にないわけではないのでして、カーブは立っているわけです。仮りに $\theta \sim 1$ の辺までまいりますと、話は大分面白くなってまいります。具体的な実用の道ももっとでてくると思えます。



第6図 温度差の最大値と“シータ”の関係

α が大きくて、 λ, ρ が小さいものがあれば、

この値が大きくなるわけですが、ご承知のようにふつうの金属の組み合わせでは、余り大きな熱電気の係数はえられません。例えば、酸化物のようなものであれば、 1° の温度差に対して数 $100 \mu\text{V}$ といったものもでてくるでしょうし、ときには 1° に対し 1V 近くの電位差のでてくるものもあります。しかし、そういう酸化物のようなものでありますと、ご承知のように、電気抵抗が大変高くなってしまいます。そうしますと折角 α が大きくなったのですけれども、 ρ が大きくなってしまって、全体は余りよくない。それからふつうの金属でやりますと、熱伝導のいいものは、電気伝導度がいいということになります。ウィーデマン・フランツ (Wiedemann-Franz) の法則というのがありまして、熱伝導度と電気抵抗率をかけたものは、ふつうの金属ではだいたい一定の値をもっている。そうすると、われわれのねらっているような、 λ も小さく ρ も小さいということは、ふつうの金属では無理な注文ということになります。 λ が小さければ必ず ρ は大きくなる、もっと常識的に申しますと、熱をよく伝えるものは、電気もよく伝えるということになります。そういうことになりまして、電気はよく伝えるけ

れども熱は伝えない、そんなものを要求するというのはある意味でおかしいともいえる。例えば、これの両側に何かくっつけてまして、電流を流す。A は温度が下がっていて B は温度が下がっていない、あるいは、常温より高くなっているといたしますと、熱は必ず B から A に流れてゆきます。そうすると A は冷たくなったとしてもじきに温まってしまう、そうするとこれは熱伝導ができるだけ悪い方がいいことになります。そうしますと、どうしてもふつうの金属ではだめです。

半導体の登場

私が先程お目につけました式をみちびいた計算というのは実は、1911 年にもうすでに、ドイツのある人が計算したものでございます。私どもはそれを真似したり、あるいはソビエトでは自分のところで勘定したのだといって使っているだけの話でして、極めて冷静に申しますと 1911 年にちゃんと勘定はすんでいるわけです。したがって原理的には 1911 年にことが終わっているにもかかわらず、いままでこういうものを使って成果が得られなかったというのは、実はその当時は半導体というものの考え方といいますか、そういうものがありませんで、半導体の考え方は、1930 年ごろか

らでたもので、しかもこれがシリコンとかゲルマニウムとかの半導体の研究に伴って、いろいろどういう風にすればいいかということが判ってまいりましたので、ここで始めてこういうものを使ってもう一度昔やってみようというふうなようになってきたわけでありまして、私どもも先程司会をいたしました石井さんと学校を出まして同じ先生の下で、3~4年一緒におったわけです。その時、私どもの先生の木下先生という方は大変思いつきのいい方でありまして、こういうもので温度が下がるはずだが、というので銅とコンスタンタンで実験をされたことがあります。そして、その時には、 1° 下がるか下がらないかで、いわば見込み薄ということで、その後やらなかったわけでございますけれど、私どもも不勉強でございまして、1911年にそういう勘定があったのならば、そこまでよく調べてもうちょっと勉強すれば、あるいは、もう少しなんとかなったのかも知れません。いまから30年程前に一度手がけてうまくゆかなかったというので放り出してあった。それを近頃になって、やっと半導体という考えがでてきて、始めてそういうつむじ曲りのものを、ある程度利用

することができるようになりました。

探索の方針

それでは現在どういう半導体がいいかということですが、これは半導体をめくらしにさがすということではないのでして、ある程度さがし方がございます。そのさがし方はあとで幻燈でもお目にかけますが、だいたいの話はとにかく熱伝導度の悪いものがいいんだということです。ところで半導体の熱伝導度というのは、原子量が増してまいりますと、ずっと小さくなってまいります。それで、まず第一に考えられますことは、なるべく重い物質を使う方がいいのだということがひとつの大きな方針として出てきます。それから、その次に、今日は余り細かいことは申しませんが、デバイ (Debye) の特性温度という量が、いろいろの金属にあります。そういうものが割合低い物質の方がとくだということもできます。デバイの特性温度というのが実はそういう物質の弾性係数に関係があるもので、弾性係数の大きいものは、デバイの特性温度が一般に高くなっております。したがって、デバイの特性温度が低い方がいいというのは、弾性係数が小さいのがいいということでありまして、もうちょっとわかりよく申し

ますと、手ではじいた時に、ビーンという澄んだ音のしない物質，要するに鈍というのでしょうか，鉛みたいなものを想像していただきますと，原子量が大きく，そうして割合に弾性係数が小さいという物質が具体的になり

ますが，そんなものの方がとくだということも出てまいります。

そうしますと，いろいろな重い元素や合金が考えられるわけでありませう。つまりいろいろな金属にいろいろなものを混ぜるわけでご

Materia ¹	λ (18°C) W/cm·deg	$\rho=1/\sigma$ (19°C) $\Omega\cdot\text{cm}$	λ/σ (18°C) Wiedemann-Franz ratio volt ² /deg	η (standard Cu) $\mu\text{V}/\text{deg}$
Metal			6.7×10^{-6}	
Au	3.1	0.022×10^{-4}	6.8×10^{-6}	+0.2
Ag	4.2	0.016×10^{-4}	6.7×10^{-6}	-0.2
Hg	0.113	0.958×10^{-4}	10.8×10^{-6}	-14
Sb	0.224	0.40×10^{-4}	9.0×10^{-6}	+41
Bi	0.075	1.17×10^{-4}	8.8×10^{-6}	-80
コンスタンタン Cu 60, Ni 40	0.23	0.50×10^{-4}	11.5×10^{-6}	-38.9
アルメル Ni 95, Al 2, Mn 2	0.27	0.33×10^{-4}	8.9×10^{-6}	-21
クロメル P Ni 90, Cr 10	0.18	0.72×10^{-4}	12.9×10^{-6}	-20
マンガニン Cu 84, Ni 4, Mn 1~2	0.22	0.43×10^{-4}	9.5×10^{-6}	-15
InSb	0.17	3.0×10^{-4}	51×10^{-6}	-200
Znsb	0.021	19×10^{-4}	39×10^{-6}	+175
CdSb	0.013	320×10^{-4}	416×10^{-6}	+305
BiSb (Sb 9%)	0.054	2×10^{-4}	11×10^{-6}	-77
BiSn (Sn 5%)	0.047	2.85×10^{-4}	14×10^{-6}	+33
Bi ₂ Te ₃	0.021	25×10^{-4}	53×10^{-6}	+220
TlTe	0.007	1.93×10^{-3}	13.5×10^{-6}	30.0
PbTe	0.029	1×10^{-3}	29×10^{-6}	170
USSR·unknown	0.011	1×10^{-3}	11×10^{-6}	180~210

第 1 表

ございます。例えば、鉛はご承知のように天然には方鉛鉱という硫化物として出てきます。ところが、硫黄、セレン、テルルは周期律の同じ属で化学的性質は似ていますが鉛の硫化物よりはセレン化物の方が重くてとくだということになりまして、こんなものがある程度マークされることになります。

そんなようなことで、いろいろマークした物質をここに書き上げてございますが(第1表)、インジウムとアンチモン、亜鉛とアンチモン、カドミウムとアンチモン、それからこの2つだけあとまわしにして Bi_2Te_3 、鉛にテルル、それからここに、U. S. S. R. と書いてありますのは、ソ連で性質だけ発表しまして、何であるか物質について何も言っていないものです。いずれ、この問題には後でふれますが、いずれにしても熱電気の係数、それから電気抵抗率がとってあります。それで、電気抵抗率の値がなるべく小さくて、熱伝導度もなるべく小さいものにする。こういうことになってまいりますと、この表でおわかりのように、熱伝導度が大きくて話にならぬものや、電気抵抗率にいたしましても大きくてまずいと言うものがでてきます。それから、 α は大きくなくては始まりませんから、そう

しますと3つとも合格しそうだというものは表の下の方のものということになります。

テルルの産地 ——手稲山

それでテルルという物質が、目をつけられてくる物質になります。テルルとい

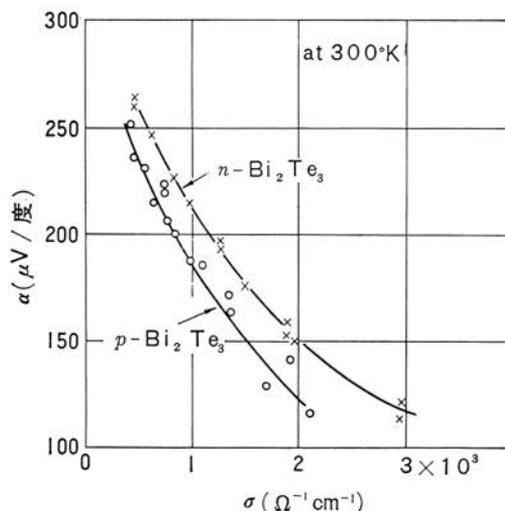
うのは、いま申しましたように硫黄、セレン、テルルと並んでいるのでありまして、化学的性質は、硫黄や、セレンに似ております。ちょっとめずらしい、あまりいままで利用されなかった元素の一つでございます。しかし、札幌の皆さんは、よく知っておられなければいけないのです。といいますのは、札幌の郊外にあります手稲の山と言いますのは、日本で一番テルルをたくさん出す山です。一番よい、パーセンテージの高い、富んだ鉱石を出します。私も昨日、三菱金属の方にご案内をねがって、手稲の山を見てまいりました。そこでとりました石、あるいは、昔とって、非常に立派だったというような標本などを、見せていただきました。手稲の山には、金とテルルが結びついた、いわゆるテルル化金の形です。分たくさん出たんだそうでございます。私は、このTeというのは、手稲の“テ”だと冗談を言ってまいったんですけど、だいたい日本で産出するものの何10パーセント、

30%位は、手稲からでるのではないかと思います。それから、洞爺湖のわきの伊達というところですが、あの辺にも若干テルルを含んでいる山が、あるんだそうです。他には、伊豆の蓮台寺の金山あたりにも出るそうです。だいたい、金銀と一緒に出来たり、あるいは、手稲の山にあります手稲石というような硫酸銅の中に硫黄の代わりに、このテルルが入っているという形などがあります。とにかく、札幌の皆さんには、テルルは縁のうすいものではないわけです。

必要な妥協をで
きるだけ上手に

それで、こういう物質ということになりますが、しかし、それだけではまだまだ思うようにまいません。そこでこの α という値はできるだけ大きくしておいて、それから、不純物を入れることによって、電気抵抗を落してやる。つまり、半導体の一つの技術として、適当な不純物を少し、適量入れてやりますと、ある程度、抵抗を加減することができます。それから不純物が少し位入りましても、 λ はあまり関係しませんので、場合によりますと上手な入れ方をしますとこちらあまり変わらない、あるいは非常に多く不純物を含みました合金のような形にして

やりますとこちらは逆に小さくなる、というようなこともできます。だいたい α を落さないで、 ρ を落とすということが願わしいことになる。ところが、残念なことに α , ρ の間にはちゃんと、それぞれ関係があって、例えばここに図を書きましたが(第7図)、だいたい熱

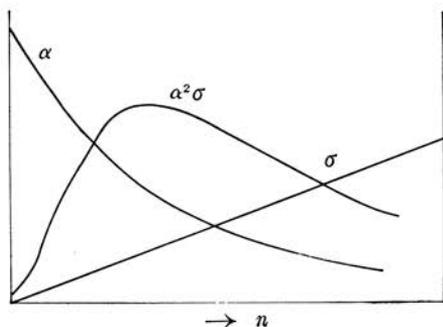


第7図 熱電気の熱電能 α と電気伝導度 σ との関係

電気の熱電能は電気伝導度がよくなりますと、対数的にずっと落ちてまいります。ですから、こちらをよくすれば、あちらが立たず進退きわまるということになり、どこかで、手を打たなければならない。それではどういところで手を打つかということが問題にな

りますが、その考え方の一つとして、こんな考え方があります。

これは、ソ連の研究者の考え方で、仮りに、荷電を運ぶ物の数 (n) を横軸にとりまして、(第8図) こういうものが大きくなりますと、



第8図 α , σ および $\alpha^2\sigma$ と n の関係

電気伝導度はよくなります。それから熱電能はこのように悪くなりますが、 α の2乗に σ をかけて、それから λ で割るというわけです。ところが λ の方は熱伝導は結晶格子のうけ持つ部分と電子のうけ持つ部分と両方ありまして、いま、仮りに定性的に図をかきましたが、だいたい格子による方はこういう荷電の運び手の量によっては変わりません。だいたいコンスタントである。それに荷電を運ぶものの量で変わっていくというものは、電子のうけ持つ部分で、このように直線的に増えている。従って、全体としては、この n という荷

電の運び手の数が多くなりますと、全体としての λ 、熱伝導度は大きくなるわけです。しかし半導体の場合は、電子のうけ持つ部分が比較的小さいので、その変り方はそんなに大きくなりません。そこで、全体の熱伝導は仮りに変わらない、コンスタントであると考えてしまいますと、先程も書きました $\alpha^2\sigma/\lambda$ のところで、 λ をコンスタントとしてしまいますと、これを除いてしまえますから、積 $\alpha^2\sigma$ を一番大きくするにはどこをとったらいかということになります。そこで定性的な図を書きますと、第8図のように α が下って σ が上っている。そこでその積を考えますと、こんな風にどこかに極大が出て、またこういう風に下がっている。だいたいこの極大に相当するような量だけ、電気を運ぶもの——電子なり、または電子のぬけがら——があれば、よろしいということになります。

これはある程度の見当です。それで、こんな風に見当をつけてまいりますと第1次近似、つまり大ざっぱな計算をいたしますと、だいたい α の値として、熱電能の値として1度の温度差にたいして170 マイクロボルト位の n 値が、ちょうど $10^{19}/\text{cm}^3$ 位なものに相当するということになります。しかし、そうい

う大ざっぱな計算では先程申しましたように熱伝導度は変わらないという仮定をしております。そこで熱伝導度は変わるのだということを考えに入れて、もうちょっと近似を進める、つまりもう少し精密な計算をいたしますと、 1° の温度差に対して 200 マイクロボルト位の熱電能を持つとすればいいことになります。それで標準にとりました銅なり白金なりに比較してプラスの 200 位、またはマイナスの 200 位、つまり高いものと低いものを組み合わせますと、 1° の温度差に対して 400 マイクロボルト位になり、銅-コンスタントのざっと 10 倍位の熱電能が得られるということになります。

再び探索の方 針について

それからさきほどは話がありこみいってとも思っ少しはしょりましたので、ちょっと補足をいたします。たびたび言っておりますように、電気伝導度がよくて熱伝導度が悪いものがほしいわけですが、電気伝導度はご承知のように電気を運んで行くものが多ければ多いほどよいにきまっております。その数を n とします。それから一つのそういう電気を持ったものが、どの位の電気量を持っているか、例えば電子なら電子の電荷 e 、

それから 1V の電位差を 1cm のあいだにかけてやった時にそういう電子がどの位速く動いて行くか、——これを仮りに μ としておきます——に比例します。この n を人の数にたとえ、この μ を歩く速さにたとえますと、 n と μ のはいた積は、ゲートで測った交通量みたいなものになります。電気伝導度はこんなものに比例するわけです。そこで数 n とか、あるいは、このような荷電の量には一応目をつぶることにしますと、 σ 、電気伝導度というものは、1V の電位差を 1cm のあいだにかけた時に、どれくらい動くか、どれくらいの速度で動くかという動き易さに比例すると見てよろしい。そこで動き易さを熱伝導度で割ったもの、こういうものを考えてみますと、これはいわばいまの仕事の「よさ」を判定する一つの資料になるわけです。そこでこういうものを、いろいろと計算してみますと、こまかいことはありますけれど目をつぶって勘定してみますと、だいたいあるコンスタントにそういう物質の密度 d をかけてそれをそういう物質の比熱と、その物質の中における音速——縦波の速度 v との積でわったものになります。ところがご承知のように一般に比熱と原子量 A の積は、だいたい一定で

あるという法則がありますので、これに積が一定だということをいれますと、式(9)のようなことになります。

$$(9) \quad \mu/\lambda \propto dA/v$$

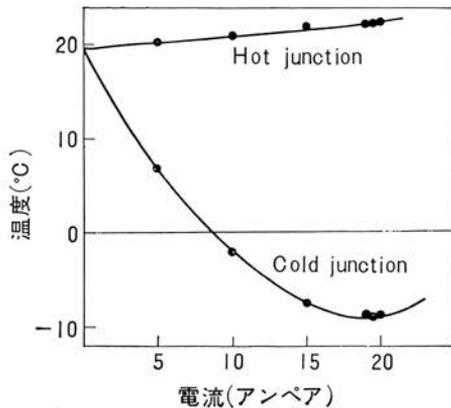
それから、これも常識的におわかりと思いますが、密度というのは原子量が増えますと大きくなります。それから音速は原子量が増えますと小さくなります。そうしますと、とにかくこの量は原子量が大きくなれば全体として大きくなります。そこで、だいたいこういう電子の動き易さと、熱伝導度の比といったようなものは、原子量の何乗かに比例する。1.5 乗か、2.3 乗か知りませんがとにかく何乗かに比例する。すなわち A が大きくなれば μ/λ が大きくなるというようなものでありまして、先程ちょっと熱伝導度は、原子量が大きくなると小さくなってぐあいがいよと申しましたが、こんなような見地から申しまして、 A が大きいということが望ましくなりまして、できるだけ重いもので何んとかうまいものはないかと探すというのが一つの大きな方針になってきております。

しかし、いままでお話してきたのは極めて大ざっぱな計算でありまして、いたるところ

に仮定が入っておりますので、これだけで何もかも割り切れるものではございません。それからまたわれわれが手に入れる物質というものがそんなに純度のよい物質が得られるわけではありませんから、例えば電気ののない手の数がいくらなどと申しまして始めから多少の不純物を含んでいるものでスタートいたしますから、いま申し上げたようなことからはあくまで一つの大きな方針でございまして、あとは経験的によいものを探しだしていく、あるいは、経験から得たカンを働かせてそれではこんなものではどうだろうかといったようなことをやっていくほか仕方がないだろうと思います。そこで、どれくらい温度が下がったかというようなことを次にお話いたします。

どんな成果が
いままでに得
られたか

これは私のところで今年の5月頃やった実験の結果なのですが、真空の中に入れてまして、すなわち、先程書きました効率ゼロ、一番低い温度はどこまで行くか、という条件でやったものです。それで縦軸に温度が20何度からスタートしてどこまで下がったか、横軸にはそれに流します電流がとってございます。だいたいこの程度



第 9 図

の太さ、これとこれとのあいだ位の太さだったと思いますが、だいたい 10 mm 位の直径で長さが 10 mm 位、ないし 12 mm 位の物質について行なった実験で、例えば 10 アンペア流してやりますと、20 度からスタートしてマイナスの何度位、それから 20 アンペア流してやりますとマイナスの 27 度位、50 アンペア流してやりますとマイナスの 28 度位、だいたいこれで 20 度から出発して -28 度位ですから、48 度位下がったことになります。この黒い線を書きましたのが実験したところです。

というわけで、われわれはあのような計算は非常に原始的な簡単な計算でありますけれど、だいたい見当をつけるには、あれで十分だ、とそんな風に思っています。さらに 50

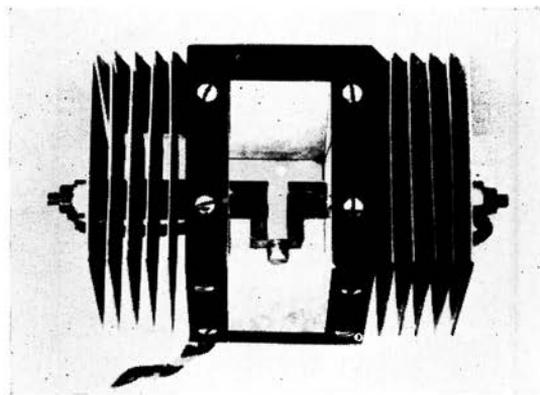
アンペアより電流を増してみますと、今度はジュール熱の方が勝ってきて、かえって温度差は減ってまいります。こんな風に温度は上り始めます。したがってこれ以上やっても意味ありませんからこの辺で実験をやめております。こんな工合にどれ位電流を流したらよいか実験的に定めていくわけです。例えばあとでお目にかけますが、今日持ってきているものは、だいたい 36~7 アンペア位流してやりますと一番低い温度になるようなものでありますし、これなんかでありますと(9 ページ写真のもの、初期のもので、あまりよくない) 30 アンペア位流しますと、おそらく一番低い温度になるだろうと思います。

そこでいままでそういう風にどれ位温度が下がったかということですが、例えば 1951 年にホワイト (White) という人のハッチングの合金というものがございまして、これは融点の低い合金でございまして、ビスマスが 91%、アンチモン 9% というものが一つ、それから、ビスマスが 95% で錫が 5%、こういった固溶体をつくりましたもの、こんなものを使いまして空気中で、実験しまして、しかも常温でやりまして、10 度位下がった。これは、ホワイトという人が半

導体であることを知って行なったのか、知らないで行なったのか判りませんが、少なくとも半導体を使った最初の実験だという意味で、このような仕事の上では歴史的な仕事だといってよろしいと思います。

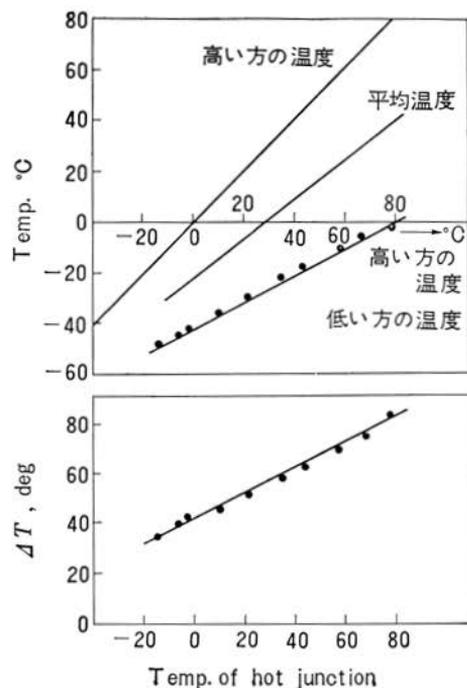
それから 54 年に、イギリスのゴールドシュミット (Goldsmid) という学者がビスマスの単結晶と先程からいっております Bi_2Te_3 という物質、これのわりあい純度のよいものを作って実験をやりまして、常温からスタートして 26 度ほど下っております。この仕事もかなり反響を呼びまして、私どももこの仕事を見て、昔同じようなことをやっていただけに刺激となったわけです。はっきり申しますと、この仕事をまねしたといった方がもっと正確かも知れません。その後、同じゴールドシュミットが翌年に真空の中で——ここまでは真空中の中では行っていないのですが——真空中で行ないまして常温から 40 度位下げました (第 10 図)。

それからこういう仕事はソ連で大変発達しておりまして、ソ連ではずい分温度を下げたということをさかんに行っております。例えばある書物にのっている論文を見ますと、60 度下げたとか 70 度下げたとか、あるいは時



第 10 図 ゴールドシュミットの試作したもの

には、100 度下げたとかということが書いてあります。一応いまここで真空で 60 度と書いておきますが、こういうような数字が、そのまますぐにいつでもこのように温度が下がるのかというと、そうはいえない事情があります。なぜかと申しますと、実は私どもがやり始めてわかったことですが、例えば、こんな図で (第 11 図) 横軸には高い方の、要するにスタートする時の温度が書いてあります。そして縦軸には低い方と高い方と平均の温度をとってグラフが書いてあります。したがって、ここに書いてあります高い方の温度というのは真四角な方眼紙に書けば 45° の線になります。そして実験をします。例えば 20 度からスタートいたしましてどこまで冷える



第11図 真空中で得られた低い方の温度(上図)および温度差(下図)の、高い方の温度との関係

かという実験をしますと、 -35° 位まで下がります。また 0° からスタートいたしますと -46° 位です。結局、こういう直線と下の低い方の温度の直線は平行でないのでありまして、この温度範囲では右へ行くほど、つまり温度が高いほど拡がっているわけです。したがってこのような数字が 60° とか 40° とか書いてありますが、始めの温度は何度であるか、あるいはこの実験の平均温度は何度であ

ったのだと書いてありませんので、どの温度の範囲で物をいっているのかわかりませんので、どの程度の性能になっているのかわからない。近頃ではおのおの平均の温度はどの位あるいは何度からスタートして何度になったというようなかなり細かい表現をソ連以外の国の人たちはしておりますが、ソ連には割合そういう細かい記載がありませんのでどこまで進んでいるか、進んでいることは確かでありますけど、われわれよりずっと進んでいるのやら似たようなものやら、その辺がちょっとわかりかねるわけです。

つぎに、アメリカのホワールブールというRCA 系統の会社にいる人から私宛にきた手紙をご披露しましょう。その内容は非常に正確に表現してあります。すなわち絶対温度 300° からスタートして 59.9° 下げたというのでありまして、この実験を行なったのは今年の2月9日だそうです。まだ雑誌にはどこにも発表されていませんが、まちがいのない数字だと思います。

たまたま私どものところで1月に行ないました実験は $+30^{\circ}\text{C}$ から -31°C 位までで、このように書きますと 59 と 61 と申しますと 61の方がよく見えます。しかし2つを比べま

すと、このグラフから見ましてまったく同じ位なのです。絶対温度の 300° からスタートするのと $+30^{\circ}\text{C}$ からスタートするというので、われわれの方が少し数字が大きくなる出さうだということになりますね。そこで61と60と1度異なっておりますが、これ位の差はどちらがどうと言えないのでありまして、だいたいこの辺では似たりよったりだと思います。

それから他ではどうか、例えばオランダのフィリップスあたりでもかなり熱心にやっております。またアメリカのウェスチングハウスでは、もうちょっと少ないようであります。それからオランダのは今年の2月にフィリップスのある研究所の技師長の方がきまして幸いお目にかかってこの問題をいろいろ話し合う機会がありましたので聞きましたところが、だいたい常温から 55° 位は下げられる。だいたい似たりよったりのところにてきているようでありまして、だいたい常温から $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 位というのがいまのところの値であります。

それが先程申しました θ で申しますと、0.8のちょっと手前 0.7……、私どものところでは 0.78 位であります。実はもう少しよくなっております。現在ではもう少しいいしておりますが、このところで 2° や 3° がせいぜい

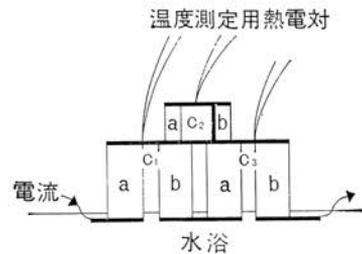
だということで大して面白くありませんので、もう $5\sim 6$ 度下がったらば、先に立って言おうかと思ったんですけど、まだこのところで 61 が 63 位になったところで大したことはありませんのでまだ黙っております。しかしこういうものはいずれも真空にしまして、外から熱ができるだけ入ってこないようにしてやった実験でございます。真空にしまして輻射で熱が入ってくるわけでありまして、もしこれを防ごうとしましたら、まわりを冷凍器か何かでじゃんじゃん冷して、まわりから輻射で熱が入ってこないようにする。そうすれば、これはもうすこしかせげると思えます。ですからいろいろと数字を表わす時の表現の仕方と言いますか、実験事実にまちがいなくとも、それぞれ弁護士の表現もできますし、検事的な表現もできますし、あるいは中正な判事的な表現もできるわけでありまして、一応この辺のところはまわりを特に冷すとか、何とかいいませんで行なって見る。まわりを冷したらどれ位よくなるだろうということもぼちぼちわれわれのところで行なっておりますが、とにかく、このところで一、二度を争うということではなくて、圧倒的によくなる、ということはまずありません。

さて、こういう効率ゼロのものは単なる付録でありまして、実際にわれわれがこういうものを使って何か仕事をしようといいたしますと、真空の中で行なうわけではありません。たいてい空気の中で、あるいは風の吹いているところで仕事をする。そうしますとこれがずっと下まわってくる。経験的に申しますと、われわれのところでも得ました経験では真空で常温から 60° 位でありますと、ふつうの大気の中に出した場合 40° 位の温度差が得られる。あるいはこれよりちょっと下まわるかも知れませんが、時には、もうちょっと上回るかも知れませんが、だいたい大ざっぱに見当をつけるには $2/3$ 位ととってよいのではないかと思います。こんな風に思っております。しかしそれに風を吹かせますともっと下がってしまいます。しかし風を吹かせて温度差を小さくいたしますと先程お目にかけたように効率の方は上ってまいりますから、何か熱をとろうという目的でありますと、風を吹かせるというのも、一つの考え方になります。それで予定の時間もまいりましたようでございますし、図表についてお話し申し上げることもある程度つきてまいりましたので、これからは幻燈を少しお目にかけます。そして応用の問題や

ら何やら申し上げることにいたします。

多段式にする

何と申しましても熱を利用しようといいたしますとなかなか難しい、特に何段か多段式に次々と重ねまして低い温度を得ようとするのは頭の中では一応想像できる、また実験もしておりますが、例えば順々に重ねまして一番上がうんと低くなって、それより下が 30° 位高い、それよりその下が 30° 位高い、こういうことを行なえば、2段にすれば上と下では 60° の差が得られる；あるいはもう1段もってくれば 90° の差が得られそうに考えられますが、実際にそうしようといいたしますと、なかなか難しい問題が出てまいります。それはここで得られる吸熱よりは高温側で出る発熱の方が多からずです。なぜかと申しますと低温側ではペルチエのような可逆な熱から非可逆な熱を引き算したものが利用される。高温側では

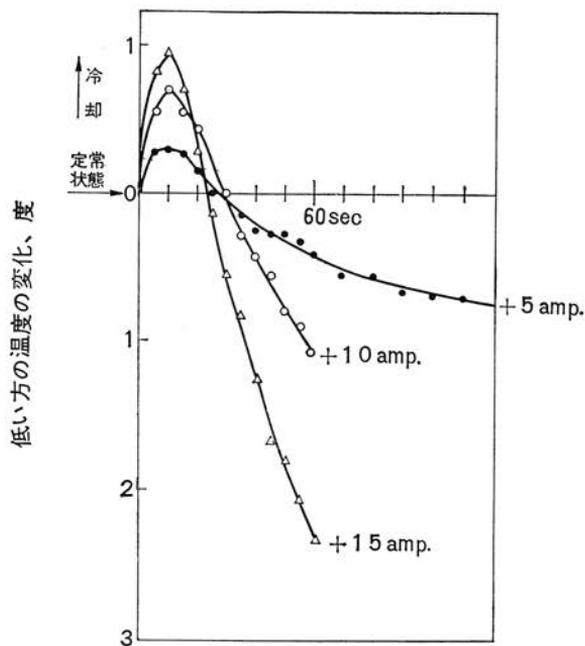


第 12 図

ペルチェ効果の可逆な熱と非可逆の熱とが加わって、どうしても吸熱よりは発熱の方が勝つわけで、それでなければ熱力学はうそになるわけですね。このシステム全体として効率が1より大きくなるか、あるいは1になってしまうから、こちらが上回るのは当然であります。そうしますと同じものを重ねたのでは、この下のここは決して最初の温度より低くなりません。むしろ始めの温度より高くなります。したがって多段式にするためには上に小さいものを乗せて下に大きいのを置く、したがって3段にでもしようとするのでありましたらピラミッドのように、大きなものの上に小さなものを乗せて、さらにその上にもっと小さいものを乗せるというように、少し表現が誇張かも知れませんが、そんなことを行ないませんといけません(第12図)。

それからこれは実用的にはあまり意味のないものかも知れませんが、先程ある電流のところでは最大の温度差を得られてそれ以上になるとジュール熱が勝って温度差は減ってしまう、かえってあたたまるのだと申しましたが、例えばこれは40アンペア流しておいてやりますと46°……という温度差が得られる。そういうものにわざと、例えば40アンペアで

なしに52アンペア流してやりますと、ある時間、20秒位とか、あるいは15秒位とかたかちますと、かえって温度が下がります(第13図)、それから後は熱がだんだん伝わって

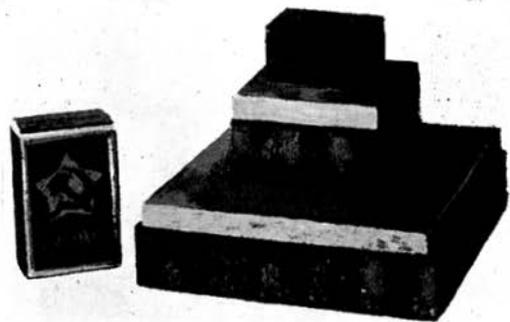


第13図

くるものですから、温度差はなくなってしまひまして、この場合ですと、三十何度になってしまいます。すなわち、わざと適当な電流よりよけいな電流を流してやることで、瞬間的に、ある程度温度を下げるができるということをお目につけたのであります。使

い方によってはこんな様な使い方をすることもあり得るわけでございまして、例えば断熱消磁という、強い磁場の中に入れておきまして急に磁場を切って低い温度をつくる、という絶対0度付近の時に行われる方法がありますが、その効率をこのあいだ、ちょっとあたってみたところ、20 kW 時使いまして 1/5 カロリー位の熱量を得ている。効率に直しますと 10^{-8} で、まあ何千万分の1だか何億分の1だかわかりませんが、その位の効率の悪いものでありますけれど、学問的に意味あるものだということになりますと、あえてそのような不経済なことも行なうわけです。実際の応用に意味はないのですけれど、物理屋が場合によったら、こんなことをやって見たいということがあるかも知れませんが、ちょっとこんなことを述べたわけです。

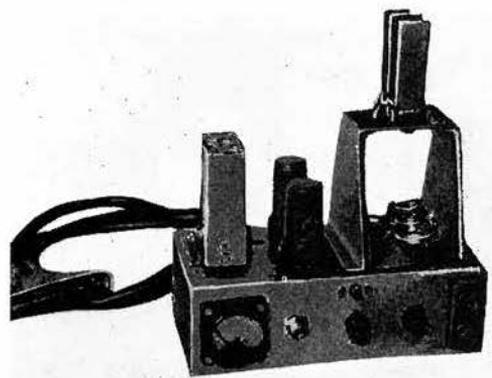
カスケードにした時の写真をお見せしますが(第14図)、実際おやりになる時には経験的に申しますと発熱が大きくて下の方が負けてなかなか冷えてきません。ソ連の経験ですと一番上を1として、その下は4にしておく、またその下は18位にしておくといっておりますが、われわれの経験では1に対して10位にするとか8位にする、その下はそれのま



第14図 多段式にしたものの写真

た10倍にするとか、そんなことをしないと下がりません。しかし現在われわれのところではちょうど42ほど組み合わせたありあわせのものがあるのですが、42の上の一つ乗せまして空気中でここが $+35^{\circ}$ で、ここが -55° という 90° 位の差を2段にして、重ねております。これももう少しコンパクトにして、いろいろ実験をされる方の便宜を得られるように工夫して見たいと思っています。

とにかく熱量を利用しようとするすと、いろいろ難しいことがあります。例えば熱量をそれほど多く利用しないでとにかく温度が下がってくれば良いということですが、仕事が楽なので、これはソ連で試作しました露点湿度計です(第15図)。露が結ぶ温度から湿度を判定しようというものでございまし



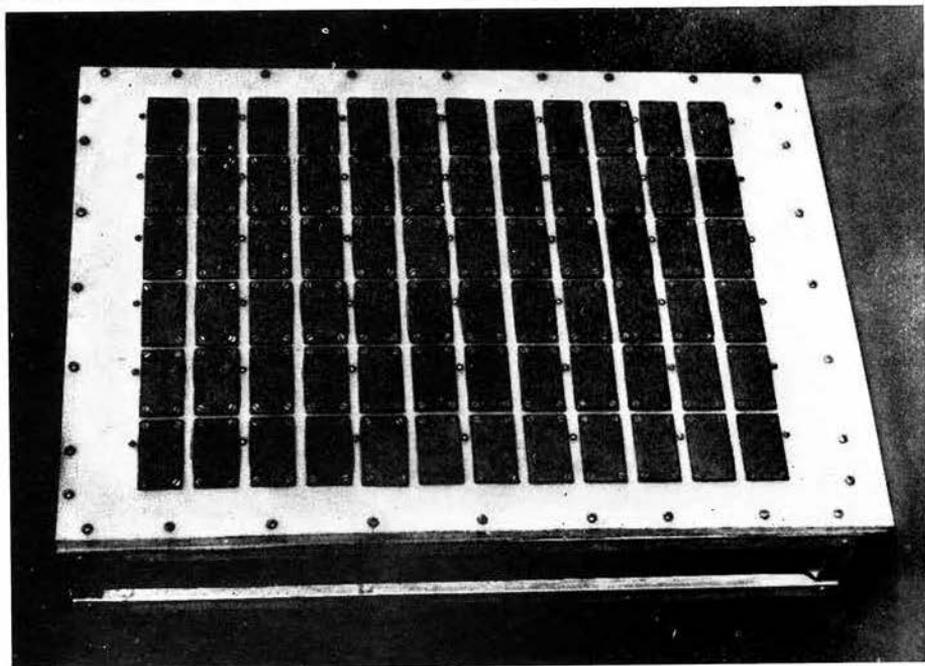
第 15 図 ソ連で試作した露点湿度計

て、問題になっております熱電素子と申しておりますものが、ここに逆立ちといひますか足の方を上に向けてついております。下の面に銀メッキがしてあります、ここから光が出まして光電管に入る。その光電管に入る光の量で露が結んだか、結ばないかを知らうというわけです。それで片側

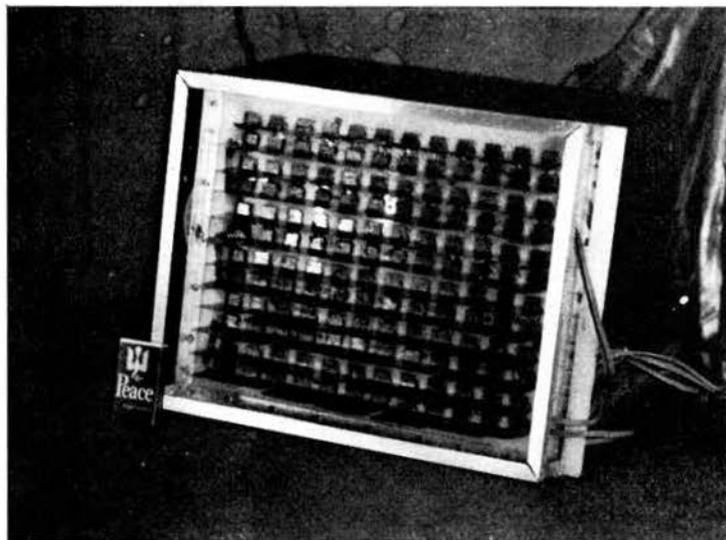
が熱くなりますから、ここにフィンを生はやしまして放熱をします。

実用への道

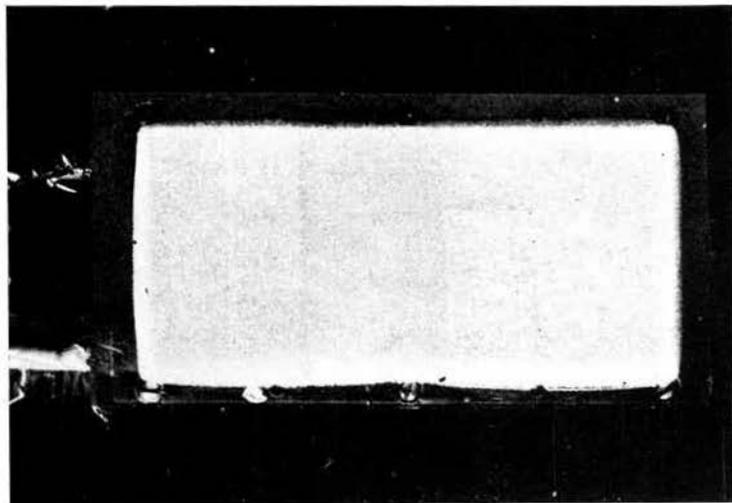
それでとにかく、小さな物を作っていたのでは、なかなか実用的に利用できそうもないので、一昨年の2月頃に、一つではおもしろくないのでたくさんつけてみようではないかということで先程お目にかけたこのやや大型のものを72個連続的につなぎ、だいたいこの長さが35 cm位、こちらが二十何 cm になります(第 16 図)。しかし裏で発熱するわけでございますから、



第 16 図



第 17 図



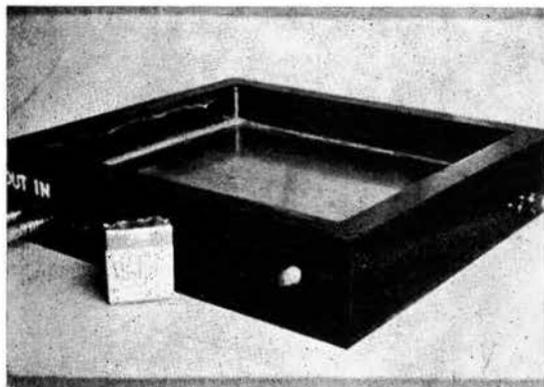
第 18 図

裏にこのようにひれをつけて、さかんに放熱をさせる。私ども一昨年2月でございますから、まだ経験が浅くてこれ位ひれをつけたのでございますけれど、これ位のひれをつけたのでは、とてもお話になりませんので、これはいわば失敗の作をお目にかけてのわけです。

つぎに、これは今年の10月頃作りしましたものですが、今日実物を一つもってきておりますが、先程からおめにかけていますのを42個シリーズにいたしました。これを一つコンパクトなものにして見ます。だいたいの大きさがこれが15cm、これが7~8cm位です。これは電流を流しますと、例えば、反対側が熱くなって、こちら側が冷たくなります。

それで冷たくなりますと空気中の水分がくっつくものですから、これは霜がくっついている。いまこの境のところだけはわかりますけれど、こんな風に霜がつかます。

つぎに、これはそのようなもの

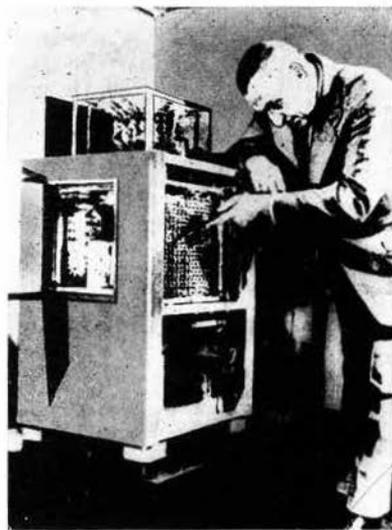


第 19 図

を利用して、写真の現像の時のバットを作っ
て見たものです。それは、カラーの写真など
の場合、現像液の温度とか濃度とかいうもの
は大変やかましくて、夏は温度が上ってま
ずい、そうかといって氷をたたきこめば濃
度が下がってしまってまずいというわけで、
これの温度をコントロールしてやらなければ
いけない。そんなことから、作ってみたもの
です。これはステンレス製でございます。大
きさは四つ切が楽に入れる大きさです。こ
の裏にいまお目にかけたような 42 個のものが
こことここに付いております。それに電流を
流してやります。熱くなる方は暗室であれば
水がたくさんありますから水を流してやる、
というわけです。そうしましたら 20 分位で
26° 位のものが 11° 位に下がってしまいま
した。

そんなに冷してしまっってはかえってわるい
のだから、もっと電流を減らせなどというこ
とになりまして、とにかく 20 分位で十何度
も下がるというのはわかっております。あと
はもう減らせばよいのでありまして、ある
いは数を減らすなり電流を減らせばよいの
ですから、これはもうできたも同然だと言
って、もうやめてしまいました。

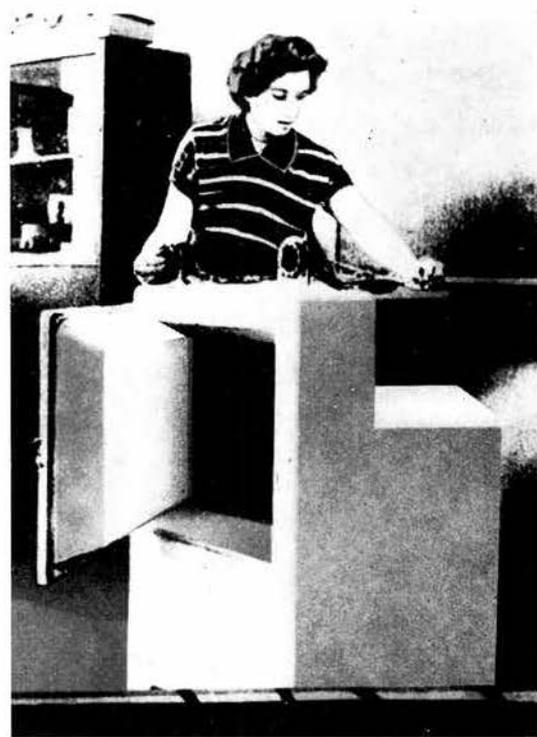
いままでお見せしましたのが、われわれの
やったものの一部であります。これが 1954
年にアメリカの RCA で始めてつくりました
冷蔵庫でございます。この指さしてござい
ます。このところに鉛筆をもってございま
して、



第 20 図

その先が先程からお目にかけておる素子の一つを指さしているのでありまして、これ全部を勘定にいたしますと、200位その素子が使っているようでございます。こういうものを54年に作りまして、RCAでは54年度の輝かしい成果の一つであると大変威張って世界中に誇ったものでありますが、実際には、こういうものは作っただけでありまして、大して温度は下がっておりません。というのは、昨年の夏にRCA関係の技術者から自分のところでやっているのだが室温からどうしても 26° しか下がらない。お前のところで割合うまくいってるそうだけれども、お前のところはどの位下っているのだというようなことを聞いてまいりましたことを見ても、これがあまりうまくいってないだろうということは、まちがいないことだと思います。

同じように、54年にソ連で作りましたのがこれで、これは、このところにミソがあります。この幻燈ではちょっとわかりにくいかもしれませんが、エレメントがこの内側についておりまして、この辺に裏側の熱い部分が出ている。そこでこのところにひれがたくさんある。それでここで冷やす。片側の発熱を、ここで放熱させる、こういうことを行な



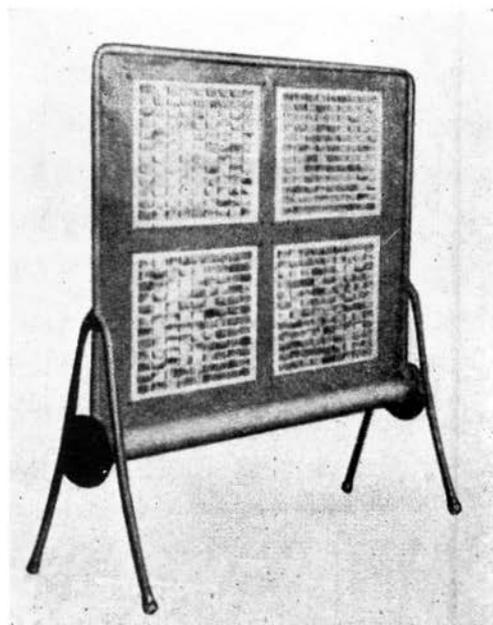
第 21 図

ったのですが、これもどの程度に冷えたかというデータについてはあまりよく知られておりません。ただ、われわれが見ましても熱絶縁に苦勞している。ふつうの冷蔵庫よりかなり厚めになっているということぐらいが、一つの特徴になっています。

それから1956年になりまして、RCAはさらにこんなものを作り、これは小さな部屋でございしますが、この部屋のこの壁に、いま

のエレメントをたくさんならべまして、それに放熱のフィンをつけて、ここからここまでが4インチでありまして、4インチの四角いフィンがたくさんならんでいるわけです。そして電流を適当にしますと、このフィンが冷えますから、この部屋は涼しくなってきます。ところで先程からお話しました原理で、電流を逆にしますと、これは温ためることができます。しかも発熱の方が吸熱よりも効率がいいことになりますから、そうしますと、温ためる方ではふつうのニクロム線のヒーターよりはるかに有利だといえますので、これは一種のエア・コンデショナーだということで大分得意になって、こういう写真を世界中にばらまきました。一昨年11月にRCAの方がきまして帝国ホテルに業者を集めて、こういう写真をばらまいたらしいのです。

つぎに、そういうものをよそが作るならば、われわれのところでは何かもう少し大きいものを作ってやろうではないか、ということになったのが、一昨年の夏でございます。一昨年の夏に、先程お目にかきました72個と申しましたものを4つまとめました。これは実物より少し大きく写っております。この方向が約1mちょっと、こちら側が70cm位だと思



第 22 図

います。こんなものを、このように作りまして、こちら側が冷える、裏側があつくなりますから裏を水で冷すようにして、ここにパイプをつけまして、水を流してやる。そうしますと、空気中の水分がたまってポタポタと、たれますので、このところがぬれるといけませんから雨どいを置いて水を避けたという、大変無格好なものであります。とにかく、ある程度大きなものをこしらえてみなければ、始まらないというわけで、こんなものを作って見たわけです。



第 23 図

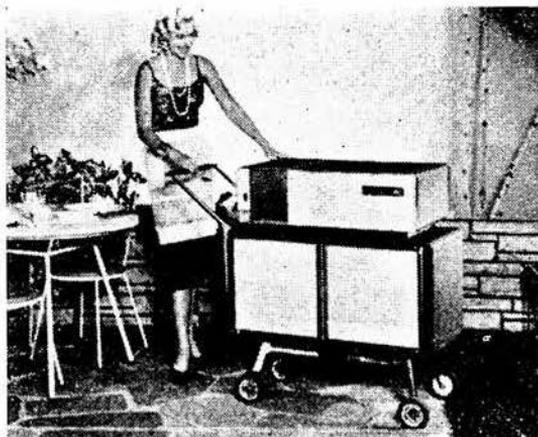
つぎに、そうこうするうちに外国でも妙なものを作り始めました。これは昨年ウェスティグハウスで作ったものです。赤ちゃんのミルクの瓶を温ためたり冷やしたりする、冷やすのがいいのか、悪いのか知りませんが、とにかくミルク瓶を温ためたり冷やしたりするというものです。ミルク瓶の大きさがこれ

位です。さかさまに、こう入っていきます。あるいはこの中にミルクをあけてしまってもよいのかも知れません。ここに円筒状に熱電素子が列べてありまして、内側が冷たくなって外側が熱くなる。したがって外側に、たくさんフィンをつけている。このギザギザになっておりますのがフィンで1枚、2枚、3枚…とずっとあるわけです。このフィンの全体の面積は9平方フィートと申しますから、1尺角の板4枚半位に相当するものが、ならべてあるということになります。

つぎに同じ時に、ウェスチングハウスでホステス・カーというものを作りましたが、これは調理室で食事をこしらえて食堂に連で行く間にアイスクリームが溶けてしまった



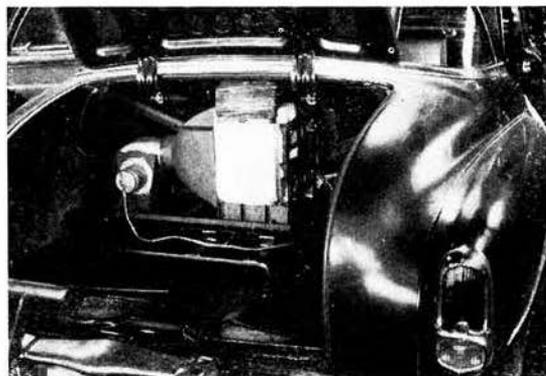
第 24 図 (a)



第 24 図 (b)

り、あるいはスープがさめてしまつてはまずいというので、熱電素子をこのところに仕掛けてあります。これで見ますと、ビールが入っているようでありますから、多分、下が冷たくて上が熱い、そういうのだと思います。こんなものを作りましても、売る意志は全然ないのでありますが作って見せております。

そこでわれわれも、もう少し工夫して、といつてはなんですけれど、作つてやれというので、こんなものを作りました。これは自動車に乗つての方が、どうせ金持の話ですけれど、自動車が熱くつてやり切れませんので、夏に自動車を冷やしてやる。というので、トランク・ルームというのですか、うしろにゴルフの道具などを入れる場所があります。あ

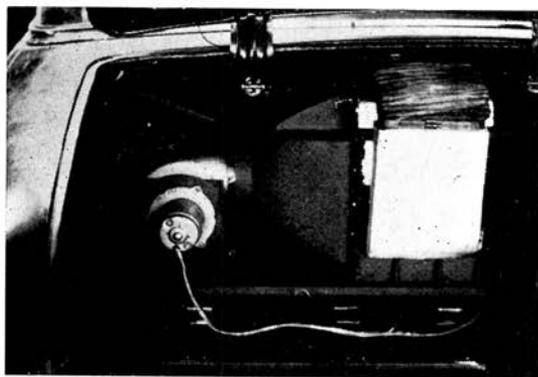


第 25 図

そこに、いまのやつを入れまして、ファンをつけて、風をここから吹き出す。ちょうどこれが、肩口といひますか、首すじ位のところになりまして、1人で乗る時は、この両方閉めて真中だけ開けておく。そうすれば、1人だけ涼しさを享樂できるというわけです。それから、片方はあつくなるので、冷やすのは、ここに耳をつけまして、ここから走つておきますと、自然に風が入つてまいります。それから自動車は6Vなり12Vのバッテリーを持っておりまして、大電流を流すというようなことは大して苦勞になりませんので、こういうものは、値段とか売るとかいうことを全然度外視いたしますと、実験としては割合に面白いくものであります。それで、こんなものを作りましたけれども、実際にはあまり

冷えませんで外が $30\sim 32.3^\circ$ ありますね。そうしますと、これは黒塗りの自動車ですから、この中は 40° 位、止っておれば $45\sim 50^\circ$ 位です。走ってくれますと、外気とそう大して変わらない。そこで、ここから 4° 位冷える風が出てきまして、 26° 位ですね。少し位、首すじにあたれば涼しい、というよりは、まあ暑くないといった方が正確かも知れませんが、こんなものをつくりました。

それをもう少し引き出し口を大きく写しましたのが、これでありませう。うしろの四角なところがこれでございます。ここにファンが



第 26 図

ありまして、ここに熱電素子がしこんであります。このファンで風を送りまして、その風が冷たくなって出てくる。この大きさは、14 インチのテレビをもう少し小型にした位

です。どうせ金持が使うのだと思いますから、あまり大きな物をここに入れてしまいますと、ゴルフの道具が入らない、ゴルフの道具が入らない自動車などというのは、金持にとっては意味のないことだといわれそうなのでゴルフの道具はあくまで入るようにというつもりで今度つくりました。

まあ、だいたいこんなところでございまして、まだまだこの程度では、具体的に利用するところまでは行っておりませんので、世界各国とも市販の家庭用品というものは作っておりません。しかしもっと科学研究用の道具で、急所だけ冷やせばよいというものでありますと、かなり具体的になりまして、実は私どももある電気メーカーからフォト・トランジスターの雑音を減らす、熱電流を減らす意味でフォト・トランジスターを冷やしてほしいというので、いまお目にかけたパネルを2つほど使いまして、フォト・トランジスターを1個冷やすものを作りました。そのメーカーの方に渡しましたら、それでだいたいよさそうだから、自分の方の設計をそれに合わせて、作るとかいておりましたので、まあ、そういったような実験室的ないろいろな道具に利用するということは、ぼちぼち考えられ

てきているのではないかと思います。こちらの气象台の山岡さんのところでも湿度の測定その他にご利用下さるといってお話なので、今後このようなものを山岡さんのところで使っていただくかというような話もしてまいりましたわけでございます。

まず、ぼちぼち、ごくわずかな熱量で、よろしいというものが、先に利用されて、そして、その次に出してくるものはおそらく効率から申しまして、ヒーターとか、クーラーとかいったような温度差をあまり要求しないもの、そして最後に出てくるものが家庭用の冷蔵庫であります。家庭用の冷蔵庫は、現在の冷蔵庫が非常に優秀でございますから、そして値段が安いですから、あのようなものにすぐ太刀打ちできるものを作れといったところでなかなか作れるものではございません。それから私どもこんな仕事をしまして冷蔵庫だとか冷風器だとかいったようなもの

を、割合に勉強して見ましたが、現在のものをもう少し性能をよくするといったようなことは十分できるのではないかと感じております。幸か不幸か、競争相手が無い；冷蔵庫にしましても冷風器にしましても、われわれ買いましても、性能がカタログ通りに出ているかどうかということは、そうちょっと簡単には実験できません。そこで、ある程度現在の冷蔵庫メーカーなんかは多少良い気持ちになって安心していらっしゃるのではないかと思います。仮りにこんなものができたとしますと強敵現わるということになりますから、随分、真剣にやられますと、もうちょっと能率も上がるでしょうし、よくなる。そうしますと、これらはまた追い抜かれることになりますので、電子冷蔵庫などは末の末と、そんな風に思っております。大変長い時間、ご清聴下さいましてありがとうございます。



ニールス・ボーア教授 記念学会の記

有山兼孝*

ニールス・ボーア教授が原子構造の量子論を提唱して近代物理学の基礎を築いたのは1913年であり、本年はその50周年に当るので、これを記念する学会がこの7月8日から13日まで、同教授の主宰していたコペンハーゲン大学理論物理学研究所で開かれた。この会合の計画は昨夏つくられていたが、その後11月18日にボーア教授の急逝という思いもかけない痛恨事があったので、こんどは偉大な故人に賞讃と感謝を捧げるという意味で、やはり初めの計画の通りに会合が開かれることになったのであった。

前日コペンハーゲンに着いて受取った出席者名簿によれば、国外からの参加者は52名(アメリカ18; スウェデン6; ドイツ, ノル

ウェー, スイス各5; イギリス4; オランダ3; ベルギー, ブラジル, フィンランド, インド, 日本, ポーランド各1), 研究所所員が26名, 研究所客員が42名(アメリカ11; ノルウェー4; イギリス, ポーランド各3; フィンランド, インド, 日本, ソ連, スウェデン, ユーゴスラビヤ各2; アルゼンチン, オーストリー, ブルガリヤ, チェコスロバキヤ, カナダ, オランダ, ポルトガル, 南アフリカ連合, トルコ各1), その他のデンマーク人参加者15名(元研究所所員, 客員等), 計134名となっていた。このうち結局不参加の人もいくらかあった模様である。外国からの参加者もすべて多かれ少なかれボーア教授の薫陶

* 名古屋大学教授。仁科記念財団評議員。



1963年8月13日。コペンハーゲンで行なわれたニールス・ボーア記念会。

- 第1列 左からパイス、ブロッホ、フント、フーストン、メラー、デニソン、ラビ、ワイスコプフ、オーグ・ボーア、ディラック、フリッシュ、クライン、ハイゼンベルク、ブラケット、クーラント、ルヴィノウィツ。
- 第2列 左からヨルダン、1人おいてグスタフソン、シュトレームグレン、ヴェルナー、ウィック、モッテルソン、トーマス、ガウシュミット、1人おいてウェルゲランド、メルシエ、ローゼンフェルト、ベック。
- 第3列 左から6人目ノルトハイム、1人おいてクローニヒ、2人おいてワイツェッカー、ホィーラー。
- 第4列 左から3人目ローリッツェン、レヴィ、筆者、1人おいてローゼンタール、ヤコブセン、4人おいてフース。
- 第5列 左から4人目ヘフナー・イェンゼン、ペーターセン、1人おいてデルブリュック、カンミア。
- 第6列 左から3人目ヨースト、ラッティンガー。

を受けた人々、教授と緊密な関係があった人ばかりであり、ハイゼンベルク、ディラック、ブロッホ、ジェームス・フランク、ラビ、ブラケットなど多くのノーベル賞受賞者を含み、大部分が世界的に著名な人々であった。参会者の顔ぶれは別掲の記念写真にみられる通りである。

学会は毎日正9時30分開会で、第1日は冒頭にこの会合の組織委員会代表のローゼンフェルト教授の開会の辞とボーア教授令息オーゲ・ボーア教授の挨拶の言葉があった。ついでクライン教授が座長となり、原子の日の日程に入り、デニソンの分子分光学、ブロッホの磁性、カシミヤの低温物理学の講演がおこなわれた。各題目はそれぞれある時期にボーア教授をかこむ研究所の関心が集中した物理学の主要分野をとり上げたものであり、回顧的展望をおこない、進んでその方面の将来を展望することが眼目とされていた。毎日、講演は午前中に各約1時間のものが二つ、午後は2時から約1時間半のものが一つあり、もちろん各講演のあとで活潑な討論がある。昼に約1時間半の休憩があり、デンマーク風オープン・サンドウィッチの昼食が出る。この昼食と午前、午後各1回のお茶は研究所か

ら供せられ、出席者がその機会に自由討論をなし得るように用意されていた。第1日のデニソンは特に分光学が量子論の建設に演じた役割について説き、ブロッホは、ボーア教授が1911年彼の学位論文において電子系の磁性が古典統計力学によっては理解し得ないことを示したことの中にすでに新しい理論に対する要求が胚胎していたのであったことを指摘し、また最近の超伝導理論に彼が満足し得ないことを述べ、ここに、そしてまた磁性との関連において本質的問題があると考えたの見解を述べた。カシミヤは全般的展望を与えて、なお今後の研究にまつべきものが低温物理学で大きいことを論じた。

第2日はヒューラー教授が座長で、原子核の日である。ワイスコプフの原子核構造の概観、フリッシュの実験原子核物理学、オーゲ・ボーアの励起のモードが講演された。ワイスコプフは原子核の複合体モデル以来のボーア教授を中心とする諸理論について論じ、オーゲ・ボーアも理論的考察を語った。

第3日は素粒子の日で、ディラック教授が座長である。最初がハイゼンベルクの発展の主路線と題する講演で、素粒子論の公理的基礎について彼の論理体系を述べ、素粒子論の

現状は量子力学建設の直前の状態に対比される、統一化される日も遠くはないであろう。また、今後の物理学における原理的的基本的新概念は生命の科学の追求においてみられるものとする、という極めて高い次元に立った大講演であった。つぎにバイスが不変量の原理と題して、不変性と保存律について論じ、午後はウィックが量子場理論について、量子電気力学が実験と極めてよい一致を示し、それが広大な内容をもつことなどを論じた。この午後、参会者の記念撮影があった。

第4日は午前が自由時間で、午後は夫人帯同で集まり、ボーア教授の古い協同研究者たちによる追憶談が約3時間にわたっておこなわれた。最初ローゼンフェルトの挨拶があり、ボーア教授の偉大さや人間的な暖かさをたたえ、1913年の3部作論文が今日もなお新鮮味に溢れるゆるぎない名作であることを強調し、その50周年のこの集まりに多数の者が集まることのできた慶びが述べられた。原子構造の話の中では長岡モデルについてもその卓見がたたえられ、また古い協同研究者の中で仁科先生が亡くなられたことが惜しまれ、さらに仁科記念財団を代表して朝永教授から寄せられたメッセージと理化学研究所の

長岡理事長からのメッセージが紹介された。ついで老J・フランク、老R・クーラントによる1913年前後のボーア教授の研究状況や研究生活についての話、カシミヤ、デルブリュックによる1928~1930年頃の話があり、最後にワイスコプフからこの会合開催について研究所所員に感謝が述べられ、彼所蔵の古くからの写真の幻燈が映され、愉快的説明が加えられ、思い出多いボーア教授のおもかげがほほえましく偲ばれた。

第5日は宇宙および生命の日で、座長はメラール教授、講演はクラインの重力、シュトレームグレンの天体物理学およびデルブリュックの生物物理学であった。クラインはアインシュタインの重力理論の基礎、重力と量子化、素粒子物理学で重力は役割をもつか、などについて述べた。デルブリュックは1932年に発表されたボーア教授の“古典物理学→原子物理学→生命の科学”についてのコンプリメンタリティーの意義から始めて、ケルン大学における彼等の分子遺伝学研究について述べ、界面の重要性、高分子からできたバクテリアの連続壁の問題を論じ、また今日の生物物理学は1910年頃における量子論に対比される発展段階にあるという見解を述べた。

以上が講演のごく大体の模様である。この全体を通じて特に感じたことは、この学会は極めて意義深く、また学問的に豪華であったが、講演も討論も、出席していたいろいろな分野の人々、また理論家、実験家のほとんど誰にも真意が理解できるよう非常に努力してなされており、いわば特定分野の専門的よそおいが拭い去られて、真の物理そのものだけが論じ合われたことである。講演者がすべて大家中の大家であったことにもよるであろうが、そのことはボーア教授を中心としてできていた雰囲気、コペンハーゲン精神の一つの現われともいふべきものとの感が深かった。参会者全部がいわば一つの研究室で共に論じて合っているかのような感じであり、まさしくこの会合の目指していた family reunion が実現されたのである。

第6日にはエクスカッションがあり、夫人帯同で10時に研究所前からバス2台で出発、デンマークの田園風景をめでながら、まずリソーにあるこの研究所の新研究室を参観した。オーゲ・ボーア教授指導のもとに、12 MeV フォトン加速器を囲んで非常に多方面の実験がおこなわれていた。ついで同じ場所にある実験原子炉ステーションをバス中から

見て、さらに北方海岸地帯にバスを走らせ、ロスキルド・フィヨルドのカルウォ館で昼食、自由懇談した。帰途は森林地帯を走り、ボーア教授の夏の家を訪ねて暫く休憩。ここは文字通り森の中の家で、簡素で渋く静寂で全く素晴らしい。仁科先生や高嶺俊夫先生などが何度もきて、長時間ボーア教授と論じ合われたとのことを教授夫人が語られた。夕6時頃研究所に帰着して今回の会合に別れを告げた。

会期中、研究所にはいくつものディスカッション室が用意され、またほとんど毎晩研究所教授たちが15~30名の参会者をかわるがわる自宅などへ招いて夕食を供し、夜おそくまで誰もが自由に話し合えるよう、気が配られていた。インフォーマル・ミーティングのための時間をたっぷり用意するといわれていたのが、まさにそうであった。しかし毎晩のように多数の客を迎えた教授たちは、なみ大抵のことではなかったであろう。また3日目の晩はカールスベルクの宏壮なボーア教授邸に夫人から参会者全員が夫人共々招かれた。ここはカールスベルク・ビール会社がデンマーク最高の学者に一代限りで提供している大邸宅である。教授の書齋はこのときも生前の



右よりオーゲ・ボーア、ボーア夫人、
マイトナー女史

ままだに保たれていた。晩さん後令息ボーア教授から父教授の生前における諸氏の厚誼に満ちた協力に対し、また今回多数参会されたことに対し、感謝するとの挨拶があり、ついでハイゼンベルクからボーア教授の天才と熱情とその暖かい指導により今日の物理学の発展がもたらされたことなど、あらゆる意味の賞讃と感謝の辞が述べられ、また特に教授夫人に対しては今日こそあなたに感謝の言葉が捧げられる日であると述べ、参会者一同の胸に迫るものがあつた。晩さんのあつた大食堂は教授が夜更けるまで人々にじゅんじゅんと語りながら何回となく回り歩いたことで有名な室であるという思い出が口々に交わされていた。

また会期中、1913年のボーア教授の3部作論文“原子および分子の構造について”の新しいプリント版と“ニールス・ボーア”と題するデンマーク物理学誌特集号(1963)と“ファウスト”と題する量子力学発展の歴史のユーモア風ドラマの謄写版刷り小冊子とが参会者に配られた。リプリント版にはローゼンフェルトの44頁にわたるイントロダクションがあつており、1911年から論文発表前後までのボーア教授の研究生活が詳しく述べられており、感銘するところ大きい。また特集号はほとんどがデンマーク文で、教授と最も緊密な関係にあつた人々による記念論文集ともいえるものようである。追憶文もいくつかあり、教授の1909～1961年の間の論文著書リスト(143点)が載っている。

ボーア教授が日本の物理学の進歩に特別な関心と厚意をもたれ、直接間接貢献されたところは測り知れないものがある。仁科先生はじめ、先輩同僚諸氏が教授の精神であるコペンハーゲン精神を身につけて帰られ、それによって、またそれを通じてわが学界が強く影響され、大きな進歩をきたした。これらのことを、われわれは深く感謝し、銘記せねばならないと思う。

頭 脳 労 働 は タ ダ か？

我 妻 栄*

「日本の社会学者は、共同の研究をしない。」

よくいわれることである。先頃開かれた日米合同教育委員会でも指摘されたようである。

もっとも、共同の研究といっても、共同して実態調査をすることなどは、相当に効果を挙げている。しかし、共同して討議し、知能を傾けあって、ひとつの研究成果をまとめ上げる、という頭脳労働の高度の協力は、なかなか行われぬし、その効果も挙がらない。法律学の分野では、とくにそうなるように思われる。

その理由はどこにあるのだろうか。日本人の性質にもよろう。法律学者の偏狭にもよるであろう。しかし、その他にも理由がありそうに思う。

※

例えば、原子力産業に関する法律問題の共同研究を企てて、数名の者が科学奨励金か研

究補助金の交付を受けるとしよう。その共同研究の成果ができ上るためには、つぎのような段階を経なければならない。

まず第一に、この問題に関する諸外国の文献を調べて購入したり、産業界の当面している問題を調査しなければならない。この仕事は、給仕や小使のできるものでないことはいうまでもないが、適当に指導すれば、大学院の学生のアルバイトくらいでやれないこともない。

第二段には、集められた文献や資料を整理して、問題点を拾い上げ、それぞれについての考え方や出されている答を要約して、共同研究員の討議の資料を準備しなければならない。これは、共同研究の根幹をなすものであって、どうしても、助教授級の者二、三人が専念する必要がある。

第三段の仕事は、共同研究員の各自が、右

* 仁科記念財団理事。この稿は、近著「法律随想」(ジュリスト選書)から、お許しを得て転載させていただきました(編集係)。

の資料を十分に勉強して、それに基づいて討議することである。討議の結果は、第二段の仕事の担当者の手で整理されて、次回の討議の資料とされなければならない。

かようにして、資料の裏付けを伴う議題の作成→共同討議→整理→討議とくり返えされるうちに、各方面の専門家の共同研究は実を結ぶ。

ところが、文部省あたりの科学奨励金とか研究補助金などの出しかたをみると、ほとんど第一段の文献や資料の購入とアルバイト学生の費用に限られる。第二段の仕事については、でき上がった原稿を筆写したりプリントする費用は支給するが、原稿を作る労力に対する手当は絶対に支給しない。助教教授級の者の専念すべき頭脳労働はタダでなければならない。第三段の仕事については、紅茶を飲む金さえ支給されない。

＊

大学教授の俸給は低い。ことに助教教授級の者は、研究の妨げにならない限り、他の大学の講義の一つや二つは引き受けなければ、生活ができない。これは周知の事実である。上述の第二段の仕事を引き受ける余裕はない。

だから私はいうのだ。アルバイト講義の一

つをやめてその仕事をひき受けてもらう。そして、講義に相当するだけの手当を出す。そうしなければ、共同研究は決して実を結ばない、と。

それはぜいたくな話だ、わが国には、参考書を買うことさえできない多数の学者がいる、といわれるかもしれない。それを承知の上で共同研究の奨励金や研究費の申請をするのじゃないか、という人もあろう。

これに対して、私はいいたい。個人の研究に対する補助金の支給方針は、それでもよからう。しかし、共同研究は全く事情が違う。その準備をし討議の結果を整理する頭脳労働に対して報酬を与える途を開かなければ、共同研究の成果はあがらない。

科学の奨励を目的とする公益財団が、最近になって漸く復興した。こういう財団こそ、右のような支給の仕方を考えるべきである。ところが、文部省は、監督権を振り廻わして、自分のとってる同じ方針を強いるらしい。財団は、研究者の頭脳労働に対する手当の名目で支給することを極力避けようとする。すこぶる遺憾なことである。

昭和37年3月15日（「ジュリスト」246号）

ボリビヤ・チャカルターヤ宇宙線研究所

村 上 一 昭*

この2,3年間、最近の南米諸国がテレビを通して紹介され、私達の南米に関する知識もだんだんと豊かになって来ましたが、まだ南米と言えば、コーヒーなどの農業が誰でも先ず頭に浮かびます。近代の文明は、殆んど欧州、米国、日本と言った北半球において発達して来ましたので、ともすると文明の遅れた国として、南米は見られるかも知れません。ところが、現在でも、農業は重要産業には違いありませんが、近代産業、或は文化の面において南米諸国は遅れをとりもどそうとして懸命であります。従って、我が国からも農業移住民に限らず、最近は自然科学の分野でも多くの人が招待されて行くようになりました。例えば、チリーには地震学者とか建築学者が、ペルーには地球物理や太陽物理の研究者が、ブラジルには理論物理の科学者が現地において研究を続けています。宇宙線の部門についても2年前より、2つの協同研究が進められて、1つは原子核乾板による超高エ

ネルギー現象の解明にサンパウロ大学と、もう1つは筆者の参加しました空気シャワーの実験に米国及びボリビヤと、それぞれ日本の宇宙線グループとの間で、国際的協同研究がなされています。この2つの研究の内1つはブラジルとの協同にはなっていますが、実はいずれも、ボリビヤの首都ラバスの近くにそびえるチャカルターヤ山頂(海拔5200米)での実験を目的としています。宇宙線の研究には上は大気圏外から下は数千米の深い地下、或は深海にいたるいろいろな高度での実験が必要であります。我が国における乗鞍岳の宇宙観測所のように、チャカルターヤの宇宙線研究所はかなり大きな実験を行なうことができる設備を持っており、特にその高度が世界最高であることは宇宙線研究者にとって大

* 理化学研究所研究員。仁科記念財団1960年度海外派遣旅費を受けてチャカルターヤ宇宙線研究所に出張した菅浩一氏(東京大学原子核研究所)に協力して、同所の研究の組織に当たった。

きな魅力であります。ラバスの飛行場に降り立ち、始めてチャカルターヤを望見した我が国からの某教授は、旅の疲れなど忘れたかの如く独りつぶやきました。「5年間夢に描いたチャカルターヤを遂にこの眼で見ることが出来た。夢の半分はこれで実現した」と。



チャカルターヤ登山道風景

高度 4200 メートルの高原にはヤマ (llama) の放牧が見られます。背後の山はチャカルターヤのすぐ隣の山 (高度 6200 メートル) です。

最初は、細々と気象観測が続けられていたこの山が、今日のように世界注目の研究所にまで発展し、日本の真反対にあるこの研究所が我が国の宇宙線研究者にも身近かに感じられるようになりましたが、この研究所には宇宙線のみならず、天文とか地球物理の研究者も各国から数カ月の実験を行なうために、器材

を持ち込んできます。さてここで、チャカルターヤの発展の歴史を簡単に触れてみましょう。1942年ボリビアの気象観測所の手によって、気象観測が始められたのが、チャカルターヤの歴史の始まりであります。宇宙線研究所としての出発はこれより遅れて1949年ではありますが、現所長であるエスコバール教授がこの時の創始者でありました。彼は戦後スペインより渡航して来て、ボリビアに住みついたのですが、本来気象学者であった彼はラバスのサンアンドレス大学での自然科学の低調さを見て、現代物理に関する専門家を養成しなければならないことを痛感しました。その頃の南米諸国には高度の近代産業はなく、ボリビアも恵まれた天然資源に依存した鉱業中心の国でありました。そこでこれらの国々では先ず国造りの点から見て、第一に土木建築等の技術者を育成することを急務としました。ボリビアも例外でなく、大学では医学、工学が主なもので基礎科学に関するものは殆んどありませんでした。しかし、現代の技術発展には基礎科学の研究は不可欠なものであり、エスコバール教授はこの点に気付き、気象観測所とサンアンドレス大学と協同で、チャカルターヤに宇宙線研究所を作ることに成

功しました。同時に、米国のマサチューセッツ工科大学に研究上の協力を求めました。次の段階として、ボリビア人の研究者を育てる道を開く必要に迫られた彼は、1952年にリオデジャネイロのブラジル物理研究センターとブラジルにおけるボリビア人の奨学制度とチャカルターヤでのブラジルとの協同研究に関する協定を結びました。1958年チャカルターヤ研究所がブラジルと離れてサンアンドレス大学の附属研究所として独立しましたが、今日でも尚、この協定の精神は生きていて、データの交換や奨学制度とかの協力が行われています。始めチャカルターヤの一隅にトラックのエンジンにより発電していた小屋もすたれ、現在は別な場所にラバスより送電線の敷かれた立派な研究所ができて、ボリビアの原



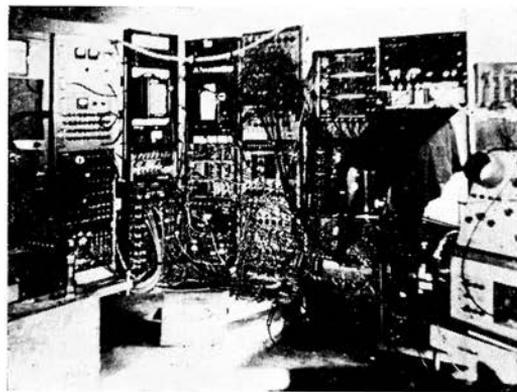
チャカルターヤ宇宙線研究所全景
散在する塔は、空気シャワー測定装置の一部。

子力委員会の仕事も代行する程ボリビアにとって重要な研究所となりました。

高度 5200 米と言えば、丁度空気の量は地上の半分になりますが、ラバスの町でさえも 3700 米程の高所でありますので、ラバスよりチャカルターヤまで自動車で山道を 1 時間半で行くことができます。その点、日本において乗鞍岳に実験に行くよりは遙かに安直さを感じます。もっとも、そうでなければ、忽ち呼吸は苦しくなり、実験をするなど考えられません。気象条件にしてもこのような高度にもかかわらず、気温も大して低くなく万年雪が残る程度であります。4 月より 9 月にかけては乾期で降雪は殆んどなく、雨期になってもせいぜい 2 米位の積雪を見る程度であります。チャカルターヤではこのような好条件の下に、宇宙線の実験は年々増して行きました。研究所で主な実験は勿論宇宙線に関するものでありますが、気象観測や大気中の放射能の測定も行なっています。建物は 2 棟あり、両方で約 200 坪程度であります。1 棟には宇宙線強度の連続観測が行なわれていて、中性子測定装置、斜方向中間子測定装置、鉛直方向入射中間子測定装置等が絶え間なく運転されています。これらの装置はそれぞれ、

米国、英国、インドより搬入され、現在は米国より経費を貰い動かされていますが、このような点でもこの研究所の国際的性格がうかがわれます。他の1棟は空気シャワー現象の研究に使われていますが、この研究は日本、ボリビア、米国の3国協同でなされていて、現在世界の関心を集めています。と申しますのは、この実験が空気シャワーの発達に極大に近い場所で行なわれるばかりでなく、主目的が、宇宙線より飛んで来る超高エネルギーのガンマ線の発見にあるからであります。10¹⁴ エレクトロンボルト以上でも宇宙線荷電粒子が宇宙空間には存在し、地球に入射し空気シャワーを起すことは既に知られていますが、このような超高エネルギーの粒子が銀河内外の空間に存在しているとすると、これらの粒子が宇宙空間の主要構成物質である水素核と、あるいは星の光と、衝突して超高エネルギーのガンマ線が発生することが予測されます。もし、こうして出来た超高エネルギーのガンマ線が地球大気中に入射すると、普通の宇宙線の場合と同じく空気シャワー現象を起すと考えられます。ガンマ線による空気シャワーが普通の宇宙線によるシャワーとの区別がつけば、超高エネルギーガンマ線の存在

が確認され、これによって銀河あるいは宇宙の構造を探る上の新たな手がかりをつかむことができるはずであります。このような観点から、昨年より実験が行なわれています。



空気シャワー測定装置

附近に散在する測定器からの信号がここに送られて来る。

そのため、ボリビア政府より鉛鉱石500トンが貸与され、60平方メートルの世界で最も広い面積のミュオン中間子測定装置を持っているのは、この実験の特色であります。現在の理論では、銀河中心方向より最も多くガンマ線が入射して来ることが予想されていますが、チャカルターヤでは澄みきった夜空に薄雲の様に光った銀河の中心を眺めることができて、このようなガンマ線天文学にとって最適の場所と言えます。

ボリビアの研究所における実験は、以上のほかに、電離層の観測やラジオゾンデによる気象観測等もあり、一つの研究所において、多角的になされています。これらの研究は殆

んど外国人の手で行なわれていますが、特に日本人の進出を大いに期待すると言った空気も起って来て、我が国からも原子核乾板による研究のグループ等のボリビア進出の気運も高まりつつあります。

