

■ 研究論文 ■

鉄屑のリサイクルを考慮に入れた鉄鋼業の省エネルギー可能性評価

Evaluation of Options for Energy Conservation in Steel Industries Including Recycling of Iron Scraps

松橋 隆治*・石谷 久**・古垣 一成***

Ryuji Matsuhashi Hisashi Ishitani Issei Hurugaki

(1993年6月17日 原稿受理)

1. はじめに

省エネルギーは、短期的なCO₂放出量の低減策として、最も有効な方策である。また、CO₂以外の環境問題と希少資源の有効利用という点からみても、省エネルギーの推進が重要であることは論をまたない。

OECD諸国は、第一次石油危機以来、エネルギー価格や供給の変動が経済に及ぼす混乱を軽減するため、省エネルギーを積極的に推進してきた。その結果日本と米国では、1973年から1986年までにE/GDPの値がそれぞれ30%と25%低下している。しかし、1986年以降は一次エネルギーの消費量はGDPにほぼ比例する形で増加しており、石油危機以降十数年間にわたるE/GDPの大幅な低下を将来にわたり期待するのは、おそらく楽観的すぎるであろう。将来における省エネルギーの推進可能性を推定するには、具体的な省エネルギー方策の利用可能性を検討しなければならない。

本論文では、産業部門の中でも最もエネルギー集約度の高い鉄鋼業に焦点を当てて分析をおこなう。鉄鋼業については、著者ら²⁾や石川ら³⁾の分析によって、現在利用可能な技術による高炉一貫製鉄のさらなる省エネルギーの余地は大きくないことが明らかになっている。一方、日本国内の鉄鋼製品の蓄積を反映して鉄屑の回収量は増加しつつあり、屑のリサイクルによる省エネルギーが期待されている。著者らは、産業関連表を用いて過去から現在にいたる鉄鋼製品別の間接投入量を算定し、それらの寿命を仮定して将来における鉄屑回収量を推定した⁴⁾。しかしこれらの検討は独立に行なわれており、高炉一貫製鉄の省エネルギー技術と鉄屑リサイクルの分析を統合する必要がある。

そこで、本研究では高炉一貫製鉄のマクロエネルギー

フローモデルを開発して、転炉鋼における省エネルギー可能性を総合的に分析し、さらにリサイクルを考慮に入れた鉄鋼業全体としての省エネルギー可能性を検討する。

2. 鉄鋼業における省エネルギー方策の分類

鉄鋼部門の省エネルギー対策を、図-1のように分類する。まず、全体を高炉一貫製鉄関連のものと電気炉製鉄関連のものに大きく分ける。現在、日本の高炉一貫製鉄による転炉鋼のエネルギー原単位は0.55TOE/t-steelだが、屑鉄からの電炉鋼では0.13TOE/t-steelとなり、前者の約22%のエネルギー消費である。このように転炉鋼より電炉鋼の方がエネルギー原単位が低いが、製品の品質は一般に転炉鋼の方が高い。そのため〈3.5〉で分析するように、鉄鋼の製品別にみると、高い品質を要求される製品は主に高炉一貫製鉄により製造される。(例外もある。)

図-1ではさらに、高炉一貫製鉄と電気炉製鉄のそれぞれの中で、鉄屑リサイクルに関連するものとそれ以外のものに分けている。ただし、両者に投入される鉄屑の種類は一般に異なる。高炉一貫製鉄においては、製品に要求される高い品質を保証するため、銅や錫などの不純物が混入することを極力避けなければならない。したがって、不純物混入の少ない自家発生屑が用いられることが多い。これに対し、いったん製品となり寿命を終えた廃棄物から回収される老廃屑や、他の製造業からの加工屑は、主として電気炉でリサイクルされる。したがって、鉄屑総量のバランスを保ちつつ、各々の配分とその省エネルギー効果は別々に検討しなければならない。

電気炉製鉄における鉄屑リサイクル以外の省エネ

* 東京大学工学部資源開発工学科助手

** " " " 教授

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

*** 財省エネルギーセンター 技術顧問

〒104 東京都中央区八丁堀3-19-9 ジオ八丁堀 4・5 F

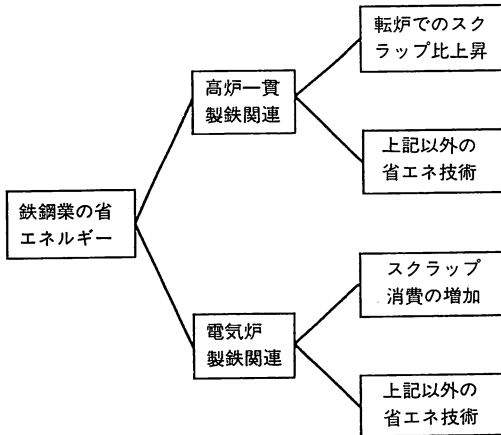


図-1 鉄鋼業における省エネルギー

ギー方策では、直流電気炉などの技術もあるが、製品によって原単位低減効果が大きく異なるため、本論文では議論せず今後の課題とする。次章以降では、各々についての省エネルギーの評価方法を説明する。

高炉一貫製鉄については、表1にあるような現在利用可能な技術の評価の対象とした。この他にプロセス運用上のさまざまな省エネルギー方策が考案され、講じられている。表1に掲げた技術の中、平炉の転炉化は日本では既に完全に終了している。また、連続鋳造、高炉炉頂圧発電装置の普及率も90%を越えている。連続焼鈍装置は冷延工程後の焼鈍工程を連続化したもので、省エネルギーというよりも、生産性を高める効果が大きい。また、スラグ顕熱回収はスラグの取扱方法に技術的問題を残している。

表1に掲げた省エネルギー方策の効果を総合するには以下の点に注意しなければならない。例えば、転炉におけるスクラップ比（粗鋼原料に占めるスクラップの割合）を増加させた場合には、溶銑の割合、ひいてはコークス必要量が減少し、省エネルギーが進展する。しかし、一方ではコークス乾式消化設備やコークス炉調湿炭装置などが既に導入されていた場合にはそれらによる粗鋼1t当りの省エネルギー効果は小さくなる。また、スクラップ比の増加は溶銑の減少を通じて、（溶銑中のCを原料とし、COを主成分とする）転炉ガス回収量の粗鋼単位数当たりの減少につながる。

このように各省エネルギー技術は互に関連し合っているため、単純に一つ一つの効果を加算することでは総合的な省エネルギー効果は算定できない。したがって、各技術の総合効果を製鉄プロセス全体の中で評価するためには、各プロセスのエネルギーの収支と全

表1 高炉一貫製鉄における省エネルギー技術

技術項目	普及率
コークス炉調湿炭装置	15%
コークス乾式消化設備	72%
高炉炉頂圧発電	92%
乾式高炉炉頂圧発電	13%
高炉微粉炭吹込量増加	—
スラグ顕熱回収装置	0%
平炉の転炉化	100%
転炉ガス回収装置	90%
密閉転炉ガス回収装置	2%
転炉スクラップ比増加	—
連続鋳造	93%
熱片挿入	55%
連続焼鈍	84%

体としてのエネルギーフローを表すモデルが必要である。著者らはIISI (International Iron and Steel Institute) のデータ⁷⁾等を基に、このようなマクロ・エネルギーフローモデルを開発した。この概念図を図-2に示す。このモデルは、鉄鋼生産プロセス全体のエネルギーバランスを算定するものである。モデルの各部分は、コークス炉、焼結機、高炉、転炉および熱間、冷間圧延などの各工程に入力される燃料の種類とエネルギー量、出力される生産物の量、副生ガス、排熱の量に基づいて構成されている。各プロセスは連動して変化するようになっており、上述した省エネルギー策が導入された場合にも、それによる一連の変化の総合として、粗鋼1t当たりのエネルギー必要量が算定されるようになっている。

このエネルギーフローモデルの中には表1に示した省エネルギー方策が選択肢として組み込まれており、各技術の導入の割合により、総合原単位が変化するよ

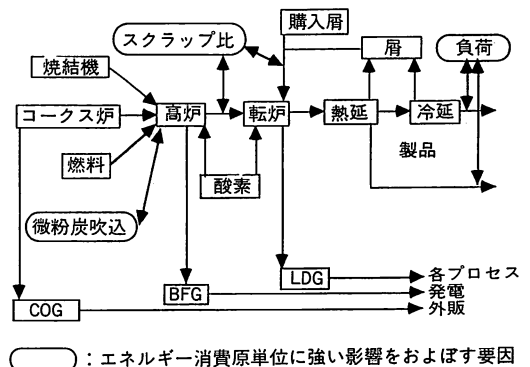


図-2 鉄鋼マクロエネルギーフローモデルの概念図

うになっている。著者ら²⁾や、石川ら³⁾によって、既に指摘されているように日本においては、既に省エネルギーがかなり進んでいるため、これ以上の大きな省エネルギーの余地は残されていない。むしろ、転炉におけるスクラップ比の増大の方が大きな省エネルギーの可能性を残している。しかし、転炉に投入される鉄屑については、品質と量の面から利用可能量に限界がある。次章では、転炉鋼と電炉鋼のそれぞれに投入可能な鉄屑の量と質を検討する。

3. 将来における鉄屑利用可能性の検討

本章では、転炉鋼と電炉鋼を含めた日本の鉄鋼業全体の将来における鉄屑利用可能性を算定する。本章の内容は大きく三つに分かれる。まず、鉄屑の将来における回収量の推定をおこない、次に転炉と電気炉の設備容量からみた鉄屑リサイクルの可能性を検討し、最後に鉄鋼製品の品質の点からリサイクル可能性を分析する。

3.1 鉄屑の分類とその特徴

本項では鉄屑の基本的な分類とその特性について簡単に説明する¹⁾。

(1) 自家発生屑

自家発生屑とは、鉄鋼製造過程で発生する鉄屑であり、その大部分は発生工場でリターン消費される。屑の特徴としては、化学成分がはっきりしており、また性状も安定している上級屑である。

(2) 市中屑

市中屑は、加工屑と老廃屑とに大別される。

1) 加工屑

加工屑とは、鉄鋼ユーザーが鋼材を加工する際にでてくる屑で、一般に自家発生屑と同様化学成分がはっきりした上級屑が多い。品質スペックが厳しい特殊鋼メーカーや普通鋼電炉、メーカーでの成分調整（不純物の希釈）用として使用されるものが主である。

2) 老廃屑

老廃屑とは、建材、自動車、家電等の鉄鋼製品が最終消費者にわたり、その耐用年数を終えた後に鉄屑化したものである。発生源がわからないものが多く、不純物（Sn, Cu, Ni, Cr等）の混入も相対的に多い。発生量としては、現在、市中屑の約70%がこの老廃屑である。

(3) 輸入屑

輸入屑は60年代のピーク時、年間400～600万トン、米国中心に輸入していた。これは日本の鉄鋼蓄積量

が少なく、発生量が需要に追いつかなかったためである。しかしその量は徐々に減少し、近年は100万トンの大台を割っている。今後、輸入屑が日本の粗鋼生産において再び重要な位置を占める可能性は低いと、後の分析においては輸入屑を除外することとする。

3.2 産業連関表を用いた粗鋼の投入量の算定手法

鉄屑回収量を推定するには、各製品への鋼の投入量を推定しなければならない。そのために、ここでは産業連関表を用いた鋼の各製品への投入量の推定と、それによる将来の鉄屑回収量の算定について述べる。

投入係数行列を用いると(1)式が成り立つ。

$$X = AX + F + E - M \quad \dots\dots(1)$$

A: 投入係数行列, X: 生産額(列ベクトル), F: 最終消費額(列ベクトル)

E: 輸出額(列ベクトル), M: 輸入額(列ベクトル), I: 単位行列

(1)式より(2), (3)式が成り立つ。

$$(I - A)X = F + E - M \quad \dots\dots(2)$$

$$X = (I - A)^{-1}(F + E - M) = B(F + E - M) \quad \dots\dots(3)$$

(3)式のBを逆行列係数行列という。Bの(i,j)要素を b_{ij} で表すとき、これは第j製品1単位の最終需要に対し、誘発される第i製品の究極的生産必要額を意味する。

いま最終需要ベクトルFの第j成分を f_j とすると、 $b_{ij}f_j$ はそれぞれ第j産業で f_j の需要があったときに第i産業で必要とされる生産額を表す。これより粗鋼の各需要部門への直接、間接を含む投入額が算定され、これと粗鋼の単価(円/t)から物理的投入量を算定できる。

3.3 粗鋼の投入量及び鉄屑の回収量の動学的分析

本節では、'60～'85年連関表を用いて将来における屑の産出量を算定する方法と結果を示す。各年における各部門への鉄鋼製品の投入量などの詳細は、紙面の都合上、著者らの過去の分析¹⁾にゆずり、ここでは算定方法の概略とその結果を述べることにする。粗鋼の生産量の推定を文献⁵⁾に基づいている関係上、文献⁶⁾の目標年である2005年までを分析対象とする。文献⁹⁾で予測されている日本の粗鋼生産量は、現在の1億t強という値からほとんど増加せず、横ばい状態で推移する。この粗鋼生産と過去における粗鋼の蓄積を基に、以下の方法で将来の屑の発生量を算定する。

(1) '60～'85年連関表のそれぞれから、各年の各部門への粗鋼の投入量を求める。その際、連関表は5年

おきにしかならないので、その間の年は技術構造が変化しないとして推定する。(’61~’64年までは、技術構造が’60年と同じであるとし、粗鋼生産量は各年の実績値を用いる。)

(2) 各部門に投入された粗鋼は製品として耐用年数を経た後、鉄屑の形で回収される。また、耐用年数はある確率で分布していると考えられる。本研究では各製品のt年後の残留率が各々の製品に固有の平均寿命Tを用いて、ワイブル分布関数により(4)式のように表わされると仮定した。

$$Y = \exp\{-\log 2 \times (t/T)^c\} \dots\dots\dots(4)$$

Y: (製品の)残留率, t: 時間(年), T: 平均寿命(年)

(3) ここで決定すべき各製品の平均寿命Tと回収率rについては、資料⁴⁾に従い基準値を定めた。

これより、i製品のj年における粗鋼投入量を a_{ij} とすると、k年における残留率は(5)式のように表される。

$$Y_{ij}(k) = a_{ij} * \exp\{-\log 2 \times ((k-j)/T_i)^c\} \dots\dots\dots(5)$$

a_{ij} に起因するk年における屑の産出量 $P_{ij}(k)$ は、(k-1)年における残留率からk年における残留率を減ずればよいので、(6)式のように表される。

$$P_{ij}(k) = Y_{ij}(k-1) - Y_{ij}(k) \dots\dots\dots(6)$$

全ての製品のk年より以前の全ての年の投入量に基づくk年の屑算出量を加え合わせることで、k年における屑の総産出量が、(7)式のように算定できる。

$$P_{total}(k) = \sum_i \sum_{j(j < k)} [a_{ij} * \{\exp\{-\log 2 \times ((k-1-j)/T_i)^c\} - \exp\{-\log 2 \times ((k-j)/T_i)^c\}\}] \dots\dots\dots(7)$$

このようにして推定された鉄屑の回収量の推移を図-3に示す。’90年以降の粗鋼生産については、電力中央研究所の中期経済予測システムの結果から、’90~2005年の粗鋼生産を推定した。図-3から、’90年以降の粗鋼生産の伸び悩みから、2005年において自家発生屑の量はほとんど増加しないが、過去の蓄積を反映して老廃屑の増加が著しく、その総量は図-3に示すように5490万tに達する。

この屑を、転炉におけるスクラップ比の増加と電気炉で消費できれば、これによる省エネルギー効果は大きいものになるであろう。これを鉄屑の消費可能性という点と、それによる鉄鋼製品の品質という点から、以下に検討を加える。

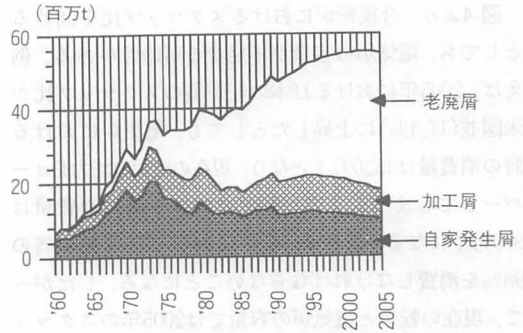


図-3 推定された鉄屑回収可能量の推移

3.4 転炉と電気炉の設備容量からみたスクラップ消費可能性

文献⁶⁾を基に、転炉と電気炉のそれぞれについて設備能力の推移をみると、電気炉の設備能力はここ数年間3000万t弱(1990年において2810万t)で安定しており、転炉も若干減少しているが、1億t強の設備能力を維持している。(ただし、転炉はその運転方法から、設備能力が実際より大きく算定される。)著者らは、前節で述べた推定鉄屑量から、2005年における転炉のスクラップ比と鉄屑のリサイクルに必要な電気炉設備能力の関係を、以下の前提条件の下に試算した。

1. 2005年における総粗鋼生産量を文献⁵⁾に基づき1億90万tとした。
2. 転炉に投入される以外の鉄屑は全て電気炉でリサイクルされるものとした。

試算の結果を図-4に示す。図中には1990年における日本(5.8%)と米国(17.4%)の転炉スクラップ比を書き加えた。

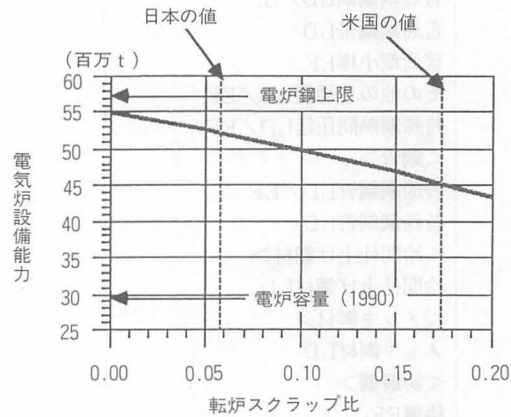


図-4 転炉のスクラップ比と電気炉必要量の関係 (2005年)

図-4より、今後転炉におけるスクラップ比を高めるとしても、電気炉の容量が不足する可能性がある。例えば、2005年における日本の転炉鋼のスクラップ比が米国並(17.4%)に上昇したとしても、電気炉における屑の消費量は4520万tとなり、現在の電炉の能力をオーバーしてしまう。一方、転炉における屑の消費量は970万tになる。これは、転炉において自家発生屑の98%を消費しなければならないことになる。したがって、現在の転炉と電気炉の容量では2005年のスクラップを消費しきれなくなり、電気炉の増設か、余剰スクラップの海外輸出などの方策が必要となる。

3.5 鉄鋼製品の品質からみた鉄屑消費可能性の検討

鉄鋼製品の品質の面からみた鉄屑の利用可能性については、鉄鋼製品別に検討する必要がある。著者らは表2のように電気炉で生産可能なものと、転炉鋼でなければ品質の保障が難しいものを分類した。表2の中で、LD/EFとあるのは、転炉鋼でも電炉鋼でも品質的に許容できるもの、LDとあるのは転炉で生産することが望ましいものを示している。なお、下の分類はあくまで目安であって、それぞれの項目の中でも例外があることを付言しておく。

この分類により、電炉鋼で賄える需要の総量を1990年の産業連関表、物量表を基に算定した。その結果、粗鋼の総量1億500万tに対し、5600万tが電炉鋼で賄える製品であると試算された。これを図-4中に電炉鋼の限界として示す。したがって、2005年における鉄

鋼製品の内訳が変化しないと仮定すれば、鉄屑の供給が前項で推定されたように増加しても、品質の面からはリサイクル可能であると推定される。ただし、現在日本の鉄鋼製品は、より高付加価値化、高品質化の方向に向かっている。この傾向が続くとすれば、銅を始めとする微量不純物の除去技術が確立しない限り、鉄屑リサイクルは鉄鋼製品の品質を保証する上で困難になるであろう。

4. エネルギー消費原単位低減の可能性

まず、転炉鋼についてみる。3.4で検討したように転炉におけるスクラップ比は17.4%まで増加すると仮定する。また、表1に示した全ての技術が2005年までに導入されたとすると、これらの技術とスクラップ比の増加から、原単位が0.47TOE/t-steelまで低下可能である。

一方、転炉で消費されない鉄屑は電気炉で消費されるものとする。電炉鋼生産量は4520万tとなる。これより、2005年において、転炉鋼と電炉鋼を平均したエネルギー消費原単位は0.32TOE/t-steelとなる。

これを、2005年の平均原単位が1990年と同じ場合と比較すると、石油換算で1020万tの省エネルギーが達成されることになる。この省エネルギー量の内訳を図-5に示す。これより、省エネルギーは主に転炉のスクラップ比上昇と電気炉によるリサイクルの増加により達成されることが分かる。

表2 転炉と電気炉で製造される鉄鋼製品の分類

<熱間圧延鋼材>
普通鋼形鋼LD/EF
普通鋼鋼鋼LD/EF
普通鋼鋼帯LD
普通鋼小棒EF
その他の普通鋼LD/EF
特殊鋼熱間圧延LD/EF
<鋼管>
普通鋼鋼管LD/EF
特殊鋼鋼管LD
<冷間仕上げ鋼材>
冷間仕上げ鋼材LD
<メッキ鋼材>
メッキ鋼材LD
<鍛鋼>
鍛鋼EF
鍛鋼EF

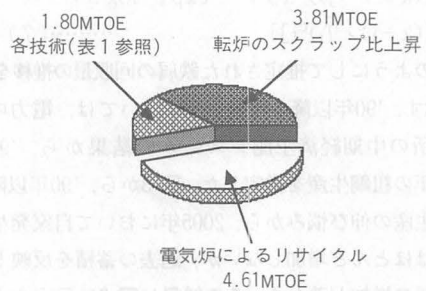


図-5 2005年における省エネルギーへの寄与内訳

5. おわりに

本研究の分析の主な成果と問題点は以下の通りである。まず、日本の製鉄業における省エネルギー効果を総合的に捉えるために製鉄プロセスのマクロエネルギーフローモデルを開発した。これにより、既存の省エネ

ルギー技術の効果は大きくないことが分かった。

次にリサイクルによる省エネルギー効果を定量的に算定するため、産業連関表を用いた屑の算出量の推定と上述のモデルを組み合わせ、転炉におけるスクラップ比の向上と電気炉を用いたリサイクルの両面から、省エネルギー効果の定量的検討をおこなった。検討の結果、2005年において日本全体で、日本の転炉鋼、電炉鋼を含めた総合的な粗鋼生産のエネルギー原単位は現在の0.42TOE/t-steelから0.32TOE/t-steelまで低減が可能であり、これにより石油換算1020万tの省エネルギー効果が期待できることが算定された。

ただし、このような急激な鉄屑の増加は、転炉におけるスクラップ比の向上だけでは対応できず、電気炉の容量も現在のままでは、不足する可能性がある。鉄鋼製品の品質の面からは、現在の製品構成が変わらないとすれば、電気炉鋼が鉄屑の増加に応じて増加しても対応できると推定された。また、このことはリサイクル率の向上のため、電気炉を増設すれば、現在ある高炉が設備過剰になってしまうことを意味している。

したがって、現在の転炉鋼/電炉鋼のバランスを保ちつつ、省エネルギーを達成するには市中屑を含めた屑からの不純物の除去技術の確立により、転炉におけ

るスクラップ比をより一層向上させる必要があり、また余剰スクラップの海外輸出も考慮に入れなければならない。

本研究を進めるにあたって、貴重な御示唆を頂いた東京大学工学部茅陽一教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) 松橋, 石谷, 茅, 永田, 山地, CO₂放出量低減策の経済性評価, エネルギー・資源, vol.12, No.5, 1991.
- 2) 松橋, 古垣, 石谷, 茅, CO₂放出量低減策としての省エネルギーの経済性評価, 第8回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, 1992.
- 3) 石川, 藤井, 外岡, 鉄鋼業のCO₂削減ポテンシャル, 第8回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, 1992.
- 4) 松橋, 石谷, 清水, 産業連関表を用いた鉄スクラップのリサイクル可能性の検討, エネルギー・資源学会第11回研究発表会講演論文集, 1992.
- 5) K. Yamaji, R. Matsubashi, Y. Nagata and Y. Kaya, 'A Study on Economic Measures for CO₂ Reduction in Japan', ENERGY POLICY, vol. 21, No. 2, 1993
- 6) 鉄鋼統計委員会, 鉄鋼統計要覧 1991.
- 7) International Iron and Steel Institute, Statistics on Energy in the Steel Industry (1990 Update), 1990.

協賛行事ごあんない

第28回空気調和・冷凍連合講演会講演募集

<共 催> 日本冷凍協会, 空気調和・衛生工学会,
日本機械学会.

<協 賛> 化学工学会, エネルギー・資源学会,
他.

<開催日> 平成6年4月19日(火), 20日(水)

<会 場> 総評会館(千代田区神田駿河台3-2-11,
TEL 03-3253-1771)

<応募資格> 共催学協会の会員であること.

<講演時間> 1題あたり講演12分, 討論5分,
計17分(予定)

<申込締切日> 平成6年1月12日(水) 必着

<原稿締切日> 平成6年2月25日(金) 必着

<参加登録費> 一般2000円, 学生は無料

<申込先> 〒160 東京都新宿区三栄町8番地

三栄ビル内

社団法人日本冷凍協会

TEL 03-3359-5231 FAX 03-3359-5233