

古代人類が考えた四大元素に学ぶ

川口 芳弘*

Learning from Four Elements Supposed by Ancient People

Yoshihiro KAWAGUCHI*

Synopsis: Four elements, that is air, water, soil and fire were supposed as the important sources by the ancient people for their living. The former three are very much understandable, because they could supply them various foods; grains, fishes and others. The last one was a indispensable item for their cooking and necessary energy source.

People utilize, at present times, electricity as a energy source for their activity. If fire is replaced by electricity, the ancient four elements correspond completely to the present ones. Quite unfortunately, however, the generation of electricity accompanies the one of polluting items to the atmosphere.

Different regulations have been issued and are being discussed toward additional control for keeping clean atmosphere all over in the world. Four elements are shortly reviewed from the points of the pollution problem, with regard to the electricity generation

Keywords: Air, Water, Soil, Fire, Environment, Energy, Life Cycle Assessment (LCA)

要 旨: 古代人類は彼らの生活実態から空気、水、土壌、それに火を四大元素と考えていた。1868年発表された Mendeleev メンデレエフの元素の周期律表のお世話になる必要はなかった。即ち、前三者は生活に必要な穀物や魚介類を供給してくれるし、火は煮炊きに必要なエネルギー源として、重要なものであった。反面、現代の我々は電気と言う極めて便利な且綺麗なエネルギーのお世話になっている。しかし、この電気を作り出す際、我々の生活に重要な環境を著しく汚している。火を電気に代えれば、古代の四大元素はそのまま今日の四大元素でもある。この様な観点から、環境問題との関連を考えつつ電力問題を展望してみたい。

はじめに

地球上に人類が住み着いてから長い間質素な生活が続いたことは想像に難くない。その間、人類の努力により18世紀半ばから蒸気利用を中心とする産業革命、19世紀後半から電気の発明によって、著しく生活レベルが向上した。

この結果、昨今では周知の様に発電に伴う環境破壊問題にまで発展した。

電気を利用する事を今更止める事は到底出来ない以上、環境との調和を図りつつ電気を利用する以外に我々の生活は保証されない。

この様な観点から電気エネルギーの問題を省エネ、新エネ、環境問題を絡めて一考してみたい。

1. 古代人類の生活模様¹⁾

古代の文明がどのような経過を辿って発展して来たかは極めて興味深いもので、先年の世界四大文明展を見られた方々も多いと思われる。

約8500年以前から人類がこの地球上で生活を始めたと言われているが、メソポタミア地方で、人類は麦を対象に最初の農耕を始めたと言われている。

又、長江文明では米文化を形成したとされている。何れにせよ、彼らは生活の為にあらゆる努力と知恵を出して、エネルギー（以下エネと略す）の確保、創作に精を出したと思われる。

その証拠として、紀元前2800年頃のエジプトのPyramid ピラミッド、紀元前3世紀頃から建設が始まったとされる万里の長城、紀元前後の南仏のPond du Gard ギャール橋など驚くばかりの巨大建築物が未だに残っている。一体どの様に彼らは重量物を運び、組み上げたのか誠に興味が深い。

* 工学部 電気電子工学科 教授
Dep't of Elect. Eng, Faculty of Eng.
電気学会 終身会員, 米電気学会 終身フェロー
IEEJ Life Member, IEEE Life Fellow

2. エネルギーを求めて来た道のり²⁻⁵⁾

その間当然、人力、畜力、風力、水力などあらゆるエネルギー源を模索した。

19世紀中頃までは、薪炭を主とした植物性燃料による火の力をも利用した。

1790年、J. Watt が完成させた蒸気エンジンが産業革命の発端となったことは周知の所であり、これと前後して石炭利用が始まり、20世紀に入ると、石油が主要燃料となった。

この間、1799年 A. Volta ボルタの電池発明は愈々電気の時代の幕開けとなった。1820年 H. C. Oersted エールステッド、同年 A. M. Ampere アンペール、1823年 M. Faraday フアラデー、1824年 F. Arago アラゴによる電流と磁気との関係が続々と発見されるに及んで、電流から動力を得る為の電動機、電氣を得る為の発電機の開発へと拍車を掛けた。

この様な経過を経て、19世紀末までには、電気を発生させる技術と、電氣から動力を得る技術が完成の域に達した。

因みに、Volta, Ampere, Watt は夫々電圧、電流、電力の単位として用いられ、彼らの業績を称えた形になっている。

この頃、Siemens, ABB, GE, WH など世界の一流電機メーカーが産声を上げている。この勢いに乗って、20世紀を迎えるが、第一次、第二次世界大戦が終了するまでは、差程でなかったネネ需要が急速に伸びた。特に日本を含む敗戦国は復興の為多くのエネルギーを必要とした。

3. エネルギー使用の実態⁶⁻⁹⁾

人間一人一日の摂取量は周知の様に、

・食糧：2500 kcal

・水：300 lit (内 飲料2.5 lit)

とされている。同時に活動の為のエネとして、家庭内だけで一人一日下記が消費されている。

電氣 4700 kcal (5.5 kWh)

ガス 3300 kcal (0.33 m³)

石油 2700 kcal (0.3 lit)

合計で約11000 kcal にもなる。

家庭外(工場、事務所、公共施設)でも略同量のエネを消費している

先ず、食糧については、古く Marthus が人口論で唱えた様に、人口は幾何学的に増加するが、食糧は算術的増加でしか生産されないとした。現在の世界人口約60億に対して、2050年には約100億にもなると予測される昨今、世界の食糧を如何に生産するかのだけでも大きな問題である。

この中にあって、日本の食糧自給率の低さも表3.1の如くで、大変な問題と言わざるを得ない。

表3.1 我が国の食糧自給率 (%)⁶⁾

	米	小麦	大豆	野菜	果実	肉	乳製品	魚介類
1960	79	102	28	100	100	93	89	110
1965	73	95	11	100	90	93	86	109
1970	60	106	4	99	84	89	89	108
1975	54	110	4	99	84	76	81	102
1980	53	100	4	97	81	80	82	104
1985	53	107	5	95	77	81	85	96
1990	47	100	5	91	63	70	78	86
1995	43	103	2	85	49	57	72	75
2000	40	95	3	84	49	55	71	66

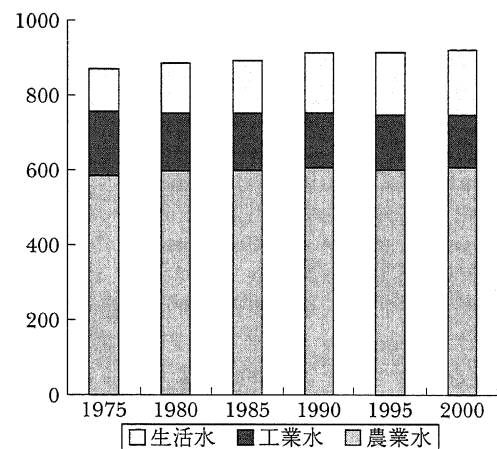
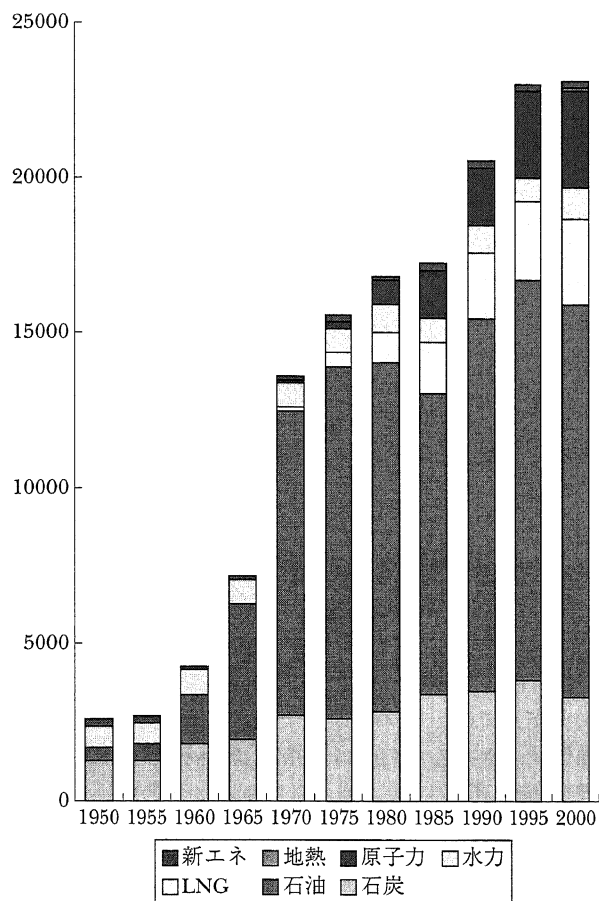
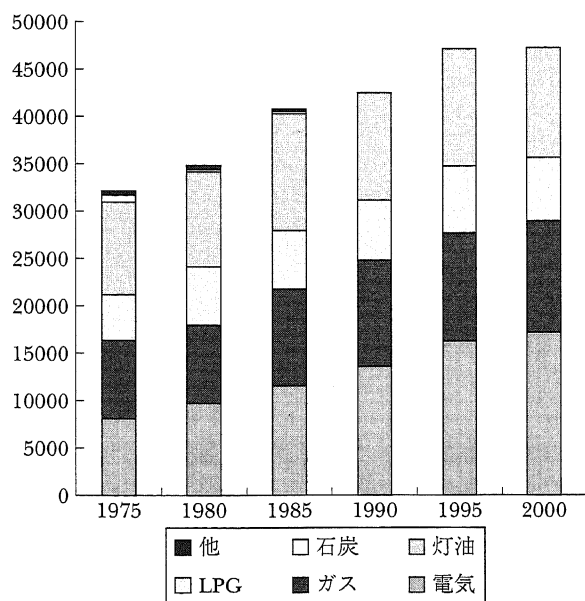
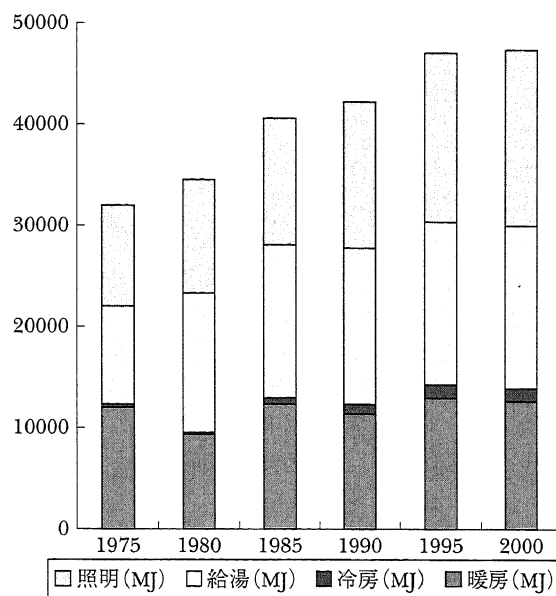
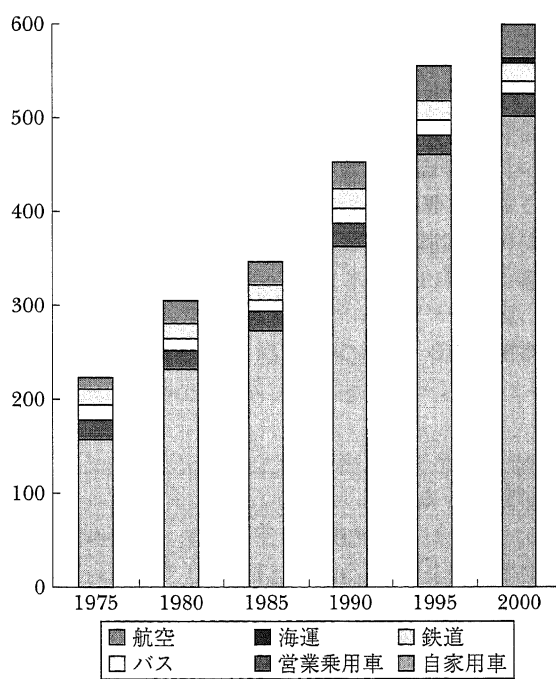


図3.1 我が国の農業、工業、生活用水 (億 m³/年)¹⁰⁾

表3.2 我が国の一次エネ輸入依存度⁶⁾

	国内 (PJ)	輸入 (PJ)	輸入依存度 (%)
1955	2127	557	20.8
1960	2389	1831	43.4
1965	2352	4718	66.7
1970	2126	11257	84.1
1975	1862	13469	87.9
1980	2481	14146	85.1
1985	3106	13861	81.7
1990	3414	16943	83.2
1995	4110	18659	81.9
2000	4539	18271	80.1

水は、日本では中近東諸国に比し、恵まれているが、図3.1に見る様に米作に伴う農業用水が如何に大きな割合を占めているかを改めて認識する必要がある。

図3.2 我が国の一次エネ使用量 (PJ)⁶⁾図3.3 世帯当たりエネ種類別消費 (MJ)⁶⁾図3.4 世帯当たり用途別エネ消費 (MJ)⁶⁾図3.5 輸送機関別エネ消費 (T kcal)⁶⁾

即ち、65 kgの米一袋の生産になんと水300 tが必要である。ついでに、肉 1 tは穀物15 tが要と言われている。

更に、我々の活動エネルギー源は図3.2の如く多様化している。しかも表3.2に見る様に大半を輸入に頼っている。

このエネルギーは産業、民生、輸送の各分野で、凡そ2:1:1の割合で消費されている。

ここで注目すべきことは近年産業界の原単位（エネ使用量/生産高）は低下しているのに比べて、民生部門の使用効率が上昇していない事である。（表には明示されていない）

一家庭当たりで見れば、エネ種類別使用量、および用途別使用量は夫々図3.3, 3.4の如くで日常生活においては、全エネの約 1/3 を電気に頼っている。

輸送部門でのエネ消費を輸送機関別に纏めたものを図3.5に示した。自家用車が圧倒的に多くのエネを消費している事は脅威である。

電気は使い勝手の良い、綺麗なエネ源であるから、近代社会において使用量が高いのは当然であろうが、これを発電するに際して、大きな環境問題を伴っている事は周知の通りである。自動車の排気ガスも全く同様に大きな社会問題である。

4. 環境問題を抱える現代⁶⁻¹⁰⁾

周知の様に、石油にせよ、石炭にせよ、これらから電気を起す時、CO₂は勿論、NOX, SOXなどの公害物質を同時に発生している。これらの気体は大気中で風に乗って、地球を巡ることになる。

大気は約4週間で地球を一回りする。水は約10日間で蒸発、降雨を繰り返している。

換言すれば、特に大気は一国だけの問題でなく、全世界或いは全宇宙的に皆で考え、対策を打たねばならない。ここに世界環境会議の意義が在る。

我が国の環境暦を振り返ると、表4.1の如くで、決して他人事ではない。

4.1. 大気

大気問題は、地球の温暖化、酸性雨、光化学スモッグ、

オゾン層破壊などの現象として捉えられている。

4.1.1 温暖化

地球上の平均気温がこの100年間に0.3-0.6℃上昇、海水面が10-25 cm 上昇したと報告されている。この原因は地球上での化石燃料の燃焼による多量のCO₂発生に起因していることが判明している。

即ち、南極観測隊は氷層中に閉ざされた空気が含有する二酸化炭素量の測定と、当該氷層中の水素、酸素の同位体から当時の気温を判定し、更に氷層中の放射性同位体から氷の年代を推定して、過去16万年間の大気中の二酸化炭素と温度との関係を推測した。

二酸化炭素と気温との関連が図4.1の如くに公表されている。近年のハワイ、マウナロア火山、岩手県の三陸町での観測からも温暖化とCO₂との関連性が実証されている。

この温暖化に伴う氷河の融水は当然、地球上に水となって流れ出てくるので、海面上昇をもたらす。この為、陸地面積の減少、作物、気候への影響をもたらす。

これらに対処する為、1997年COP3京都会議で「2010年までに、1990年対比で、二酸化炭素の発生量を6-8%減少させる」（日本は6%）議決が行なわれた事は未だ記憶に新しい。

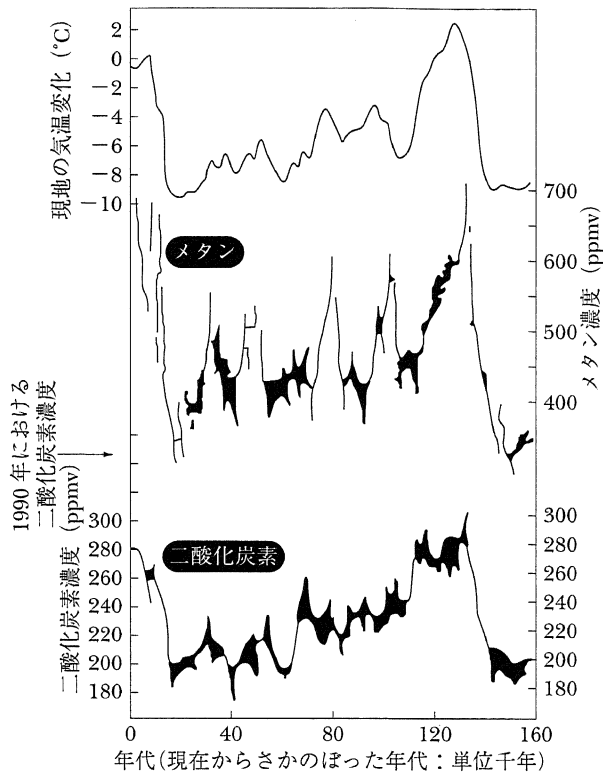
温暖化に関与する物質はCO₂のみでなく、メタンガス（CH₄）、フロン類（HFC）、パーフルオロカーボン類（PFC）、六弗化硫黄（SF₆）なども影響する。特にSF₆はCO₂の約2万倍の温暖化係数（GWP: Global Warming Potential）を持っている。

4.1.2 酸性雨

大気中にはCO₂が0.03%含まれている。これが水に溶けて平衡する時pH=5.6になる。よってpH<5.6の雨

表4.1 我が国の環境暦⁷⁾

西暦	事件	原因	対策（最新法規）	社会情勢
1935	足尾銅山事件	水質汚濁		
1955	イタイイタイ病（富山）	神通川のCd		
1956	水俣病（熊本）	有機水銀		
1956	喘息（四日市）	空気汚染		
1965	第二水俣病（新潟）			
1973				第一次石油ショック
1979				第二次石油ショック
1990				バブル崩壊
1994			環境基本計画	
1995			容器包装に関して	
1996			大気、水質に関して	
1997			廃棄物に関して	COP3 京都会議
1998			ダイオキシンに関して	

図4.1 二酸化炭素と気温との関連性¹⁰⁾

を酸性雨としている。森林の枯死、湖沼魚類の死滅などは、酸性雨によるものとされている。日本でも pH=4-5 の酸性雨の為、色々な被害を受けている。

この酸性雨は、火力発電所、工場、ディーゼル車などから出される SOX (SO₂, SO₃), NOX (NO, NO₂) が原因とされている。つまり、これらの気体は大気中の水分のため硝酸 (HNO₃) や硫酸 (H₂SO₄) となり、雨と共に落下してくる。前述したように、大気は地球上を約 4 週間で一回りするから、SOX, NOX 発生源の近隣諸国では比較的早くに影響を受ける事になる。我が国では、いち早く脱硫装置を火力発電所に設け対策に当たった。

又、NO₂ は太陽からの強い紫外線を受けて、NO と O に分解し、この O が O₂ と結合してオゾン O₃ を生成する。これが眼を刺激したり、呼吸器障害を起す。所謂、光化学スモッグである。

4.1.3 オゾン層破壊

約30億年前、酸素を必要としない嫌気性微生物が海中に発生し、これらが進化して、炭酸同化作用を持つ緑藻類となり、酸素を発生し、それが大気へ放出された。

これが成層圏 (地上20-40 km) に上り、太陽から来る紫外線 (200-300 nm) によってオゾン層と化したとされている。この為、強い紫外線は遮蔽されて、約 4 億年前に、生命が海中から出て、陸上でも生活が出来る様になったとされている。尚、成層圏では、オゾンが酸素原子 (O) と逆反応して 2O₂ を生成する現象も起こる。

表4.2 食品飲料の BOD¹⁰⁾

	BOD(mg/l)	窒素濃度(mg/l)	磷濃度(mg/l)
醤油	220,000	25,000	3,900
マヨネーズ	1,290,000	4,400	870
ドレッシング	660,000	1,500	110
コーヒー	5,900	350	62
牛乳	80,000	4,900	1,340
茶	90	15	4
ビール	89,000	340	132
日本酒	190,000	710	103
米の研ぎ汁	2,500	29	8
ラーメンの汁	25,000	1,150	280
おでんの煮汁	85,000	4,200	970
味噌汁	37,000		
古い食用油	1,550,000	1,400	2,000
台所洗剤	200,000	3,200	10

この際発生する熱エネの為、成層圏温度は対流圏 (地上 10 km 以下) 上層部の温度 -55°C よりも高い。これが地表面の保温作用を有する。

この様な過程から分るように、オゾン層は太陽から地球へ飛んで来る紫外線を遮蔽する役目を持っているから、オゾン層が破壊されると、人類は強い紫外線を受け皮膚癌、白内障などに悩まされることになる。

オゾン層破壊の原因は、フロン類と考えられている。これも亦、大気の流れで地球極上空へ運ばれ、特に南極上空では気象条件が重なってオゾン層が破壊される事が判明している。

4.2 水

凡そ人体の 2/3 は水分、血液は若干のアルカリ性 (pH=7.4) と言われている。この事実からも我々にとって、水の摂取、補給が重要であることは良く分る。

日本は、淡水、しかも軟水に恵まれ、比較的美味しい水を毎日飲んでいると私は思っている。

しかし、近年各分野での生産性向上のため、例えば農業における肥料 (N, K, P など)、殺虫剤 (DDT, PCB など) の使用、工場排水からの金属類 (Cd, As, Cu など)、更には家庭からの生活排水などは何れも河川の汚濁、有害化、内分泌攪乱物質 (環境ホルモン) の源となっている。

美味しい水とは「ミネラル、CO₂ 少々、臭みが無く (有機質、塩素が少なく) 冷たい水」と言われる。然らば、これらの水を如何に確保するかが環境問題の一課題となる。極めて多面的な要因が含まれているが、ここでは、BOD (Biochemical Oxygen Demand) を借用しよう。これは「水中に投棄された物質 (残飯、洗剤など) が水

中の微生物によって完全に酸化分解されるに必要な酸素量」と定義される。

各種食品や洗剤の BOD を表4.2に纏めて示した。統計上一人一日の生活雑排水を浄化する為、水中の酸素30 gが必要になるとされている。仮に味噌汁180 mlを川に捨てた時、約1300 lit (浴槽4.5杯) の河川量が必要になる。但し、河川中の O_2 濃度は魚の棲息限界値 5 ppm (5 mg/lit) として計算している。

4.3 土壌

一般廃棄物、産業廃棄物の土壌への投棄により土壌が汚染され、更に河川、地下水、海洋の汚染へと繋がる。廃棄物を焼却処理しても排煙を介して、大気汚染に繋がる。

従って、土壌の汚染問題は廃棄物処理の段階で考えるべき問題である。

工業廃棄物は極めて多岐に亘る。Cu, Zn, As, Crなどは農作物の生育阻害、Cd, Hgなどは植物經由人体へ、工場跡地に残留する Pb, CrF6, Hg, Cd, PCBなども色々な形で人間に影響する。

これまでに報告された野生生物の生態異常は周知の様に、それらの成長、生殖、神経、免疫と多岐に亘っている。これらの主因は農薬、廃棄物処理時に発生するダイオキシンなど有機塩素化合物で代表される。'99年4月の大阪能勢町の公害は排煙中のダイオキシンが原因とされた。

この問題に対処するには、後述する廃棄物処理法も然る事ながら、我々の日常生活においてゴミを減らす事が第一歩である。統計上、一人一日約1 kgのゴミを捨てている。その半分は家庭からで、内訳は紙類50%, 台所から30%, プラ類10%, その他10%と言われる。これに呼応して3R即ち Reduce, Reuse, Recycle が叫ばれ、リサイクルも着々と進み、缶 (Fe, Al) 80%, ビン (ガラス) 70%, 古紙55%が回収、再生されている。

正に、「分ければ資源、混ぜればゴミ」で、ゴミ分別収集の意義が分る。

5. 省エネ、高効率エネ利用と新エネ変換¹⁰⁻¹⁷⁾

現代社会において、電気の無い人間の生活は考えられない。勿論、電気を作り出す時に付随する環境破壊防止の諸対策が打たれてきた。しかし、環境の現実を見ると、現状充分な対策とは言えないのも事実である。

そこで、電気を使うに際しての省エネ、高効率利用、電気を作り出す時に環境との調和を図るに必要な技術、更に環境への影響の少ない新しいエネ源を考える必要がある。

5.1 省エネ、高効率エネ利用

現在、日本で使用されている電力量とその設備は大雑把に言って、下記である。

地球上の非循環形エネ源の埋蔵量、可採年数を表5.1

	発電量	発電設備
水 力	10%	20%
火 力	60%	60%
原子力	30%	20%
総電力	1兆 kWh	2.5億 kW

に示す。これから分るように、特に石油は40年程度で枯渇する。

化石燃料は当然有限なもので、現状のまま使用し続けられれば、2200年頃には無くなる。従って、これらを使用し始めた1900年頃から数えれば僅か300年で使い切る事になる。人類誕生以来、一瞬の出来事でもあり、現代人は将来“犯罪者”的扱いを受けるかもしれない。省エネ、エネの高効率利用が叫ばれるのは当然である。

5.1.1 熱効率の向上 (CC, Co-Gen)

旧来の火力発電はその燃料が石油、石炭、LNG のどれにせよ、蒸気を媒体としてタービンを廻しているからその間の熱効率を上げる事が大切である。

図5.1の様に、燃料の高温燃焼ガス (約1300°C) をガスタービンへ供給して先ず発電し、その排ガス (約600°C) を利用して蒸気を作り、これを蒸気タービンへ供給して再び発電する。その間の温度幅を高くして効率を上げたもので、複合サイクル発電 (CC: Combined Cycle) と呼ばれている。現状約45%の効率が得られている。従来の火力発電の効率40%より5ポイント改善されている。これはガスタービン翼などに使用される耐熱合金の高温強度材が開発された恩恵である。

又、発電に使用されたガスにしても、蒸気 (約300°C) にしても未だ多くの熱エネを有しているから、図5.2の如くそれを暖房用に供給する熱電併給システム (Co-Generation) が可能である。諸外国には古くから採用されている地方も在りし、我が国でもビル内とか、一部の地区で採用されつつある。電気と熱を合わせた総合効率は70-80%と言われている。

尚、蒸気の排熱から熱回収する際、ヒートポンプも利

表5.1 各種燃料の可採埋蔵量と発熱量⁸⁾

	確認可採埋蔵量	可採年数 (年)	発熱量 (kcal)
石炭 (トン)	9,842億トン	212	7,500 kcal/kg
石油 (バレル)	1兆529万バレル	41	8,500 kcal/lit
天然ガス (m ³)	146.4兆 m ³	64	10,000 kcal/m ³
ウラン (トン)	436.3万トン	無増殖 72 増殖 数百年	20,000 Mcal/g
電力 (kWh)	効率38%として		2,250 kcal/kWh

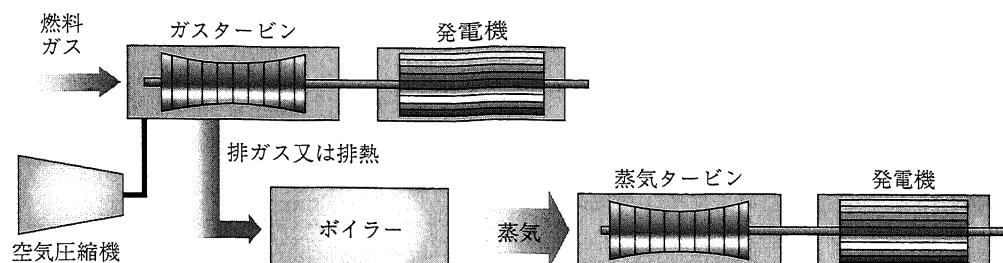


図5.1 複合サイクル発電

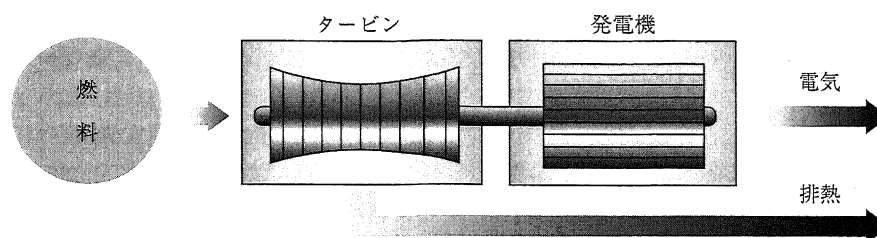


図5.2 熱電併給システム

用されている。周知の様に、これはフロンなどの媒体を用いて、低温側から高温側へ熱を移動させる装置であり、空調機などでも利用されている。電熱器暖房に比べて遥かに優れた熱効率を有する。

5.1.2 余剰時電力の貯蔵（揚水）

前表に示されている様に、原子力発電はその設備容量に対して、発電電力量が他に比して高い。原子炉の運転は一定負荷の定常運転が安定運転に繋がるからである。換言すれば、昼夜の負荷変動を原子炉に影響させない運転を続けている。

従って、電力需要が減少する夜間には揚水発電所の水車をポンプとして運転し、下池から上池へ水を汲み上げる。即ち、余剰電力を水の位置エネに変換している事になる。翌日の昼間ピーク負荷時には上池の水を下池へ流して発電を行なう仕組みである。仮に原子力乃至火力の効率を40%、揚水効率を70%とすると総合効率は30%弱であるが、これが原子力発電に対する現状の最良策とされる。

5.1.3 燃料から直接電気へ（Fuel Cell）

前二項の発電方式は何れも熱エネを蒸気にし、機械の回転エネに変換してから発電するので、発電の為の総合効率には限度がある。燃料電池は化学反応から直接電気を取り出す方式で最高発電効率60%が見込まれている。

これは図5.3の様に、水の電気分解の逆反応で、原理的にはLNG、メタノール、石油などから作られた水素を空気中の酸素と反応させて電気を取り出す。そこに残るものは水だけで公害物質は全く無い。1960年米国の宇宙船開発に際して、船内の電源と同時に船員の飲料水供

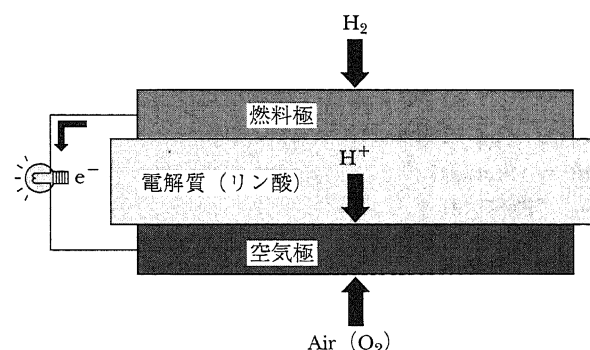


図5.3 燃料電池の原理

給源ともされたことは周知の所である。

現状は磷酸塩形のものが実用化段階に入っているが、表5.2に示す様に将来に向けて、各種方式が複合発電方式で総合効率80%を目標に開発されつつある。

この種の発電方式は数十kW-数百kWの比較的小規模のものが工場や家庭に分散電源として普及すると期待され、電力系統の大きな変革期を迎えるであろう。

この中に在って、固体高分子形は作動温度が低く、高エネ密度であることを活かして、電気自動車に30-50kWのものも搭載できる魅力が在る。

5.1.4 残存エネの回生（電車VVVF）

本年初めに東急世田谷線（元玉電）は全面的に新車になった。運転手前面の電流計を見ていると、加速時正方向に約400A、減速時（制動時）負方向に約200A付近までメータの針が振れる。多くの人々が気付いて居られ

るだろう。この後者の現象は制動時に電車が持っている運動エネの約20%を電気に変えて電源に戻す所謂回生制動 (Regenerative Braking) を行なっていることを意味する。

更に電車モータも従来の重い直流直巻電動機から軽い誘導電動機に置換され、比較的少ないエネで加速出来ている。

この技術はPE (Power Electronics) 技術の粋でもあり、新幹線“のぞみ”や私鉄で採用されている。

5.1.5 電気の貯蔵 (超電導)

1911年、オランダの Onnes オネスは水銀が絶対温度 4.2 K 以下において、電気抵抗が0になる事を発見した。超電導物質の特徴は下記の二つの現象で特徴付けられる。

(1) Meisner マイスナー効果

磁界を遮る反磁性で、近接する磁石を跳ね退ける現象

(2) Johsephson ジョセフソン効果

超電導体間に絶縁物を挟んでも両者間に電流が流れる現象

この様な極低温下のコイル導体に電流が流れる時、抵抗損失 (I^2R Loss) が発生しないので、永久に電流が流れ続け、コイル内には ($Li^2/2$) で表わされる磁気エネが保存されることになる。従って、余剰電力をこのような形で保存し、必要に応じて、外部へ取り出すことが考えられている。所謂 SMES (Super-Conducting Magnetic Energy Storage) として、前述の揚水発電に代わるものとして期待される。

又、Fly Wheel に回転エネとして電力を貯蔵する方法も考えられている。

現在この様な超電導性を実現させるための冷媒として、He の液化温度 4 K と N_2 の液化温度 77 K が考えられており、夫々に対応する超電導線材として NbTi, Nb_3Sn , V_3Ga の合金材及び Bi 系, Y 系各種酸化物焼結合金体の実用化或いは試作研究が行なわれている。前者を巻線材としたケーブル、発電機や変圧器の試作研究も進んでいるし、既に腫瘍診断などで威力を発揮している MRI (Magnetic Resonance Imaging: 磁気共鳴画像診断) の電磁石は超電導コイルによっている。又、図5.4の様に、山梨で実験中の新幹線では列車に超電導コイルを搭載した Linear Motor Car リニアモーターカーが予定されている。これにより走行中列車への給電無しで、超電導コイル内の永久電流による磁石を頼りに、地上側コイルとの間に作用する磁気浮上力と走行力を発揮出来る。

5.2 クリーン・エネへの転換

化石燃料による発電は様々な環境問題を起すので、化石燃料を一旦クリーンなエネに変換してから燃料として使用する技術も進んでいる。但し、元来が環境に影響する物質を変換しても残滓は公害物質を含むからこの処理が適当に行なわれる必要がある。又、燃焼により発生す

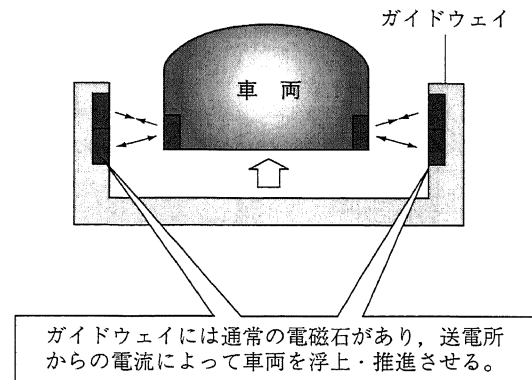


図5.4 Linear Motor Car の原理

る CO_2 を固定化する技術も研究されている。

即ち、 CO_2 は50気圧以上で液化するので、液化させた CO_2 を地殻深く 2000 m 以下或は海中 3000 m 以下で CO_2 がゼリー状となっているハイドレート層へ投棄する手法とか、サンゴや植物の CO_2 固定化機能を利用して処理する方法が考えられている。

5.2.1 石炭のガス化、液化

石炭は比較的豊富だが、固形のままでは輸送、貯蔵にコストが掛かるので、ガス化或いは液化してから燃料として使用する方が効率的である。

石炭のガス化は石炭をゆっくり加熱して熱分解させ、 H , CO , CH_4 (メタン) などのガスを生成し、燃料にする。

液化は石炭に熱と圧力を加え、水素添加の溶剤と反応させて、人造石油にする方法である。

5.2.2 水素ガスの製造

水素は重量当たりのエネ密度が高く、綺麗なエネである。化石燃料中の炭化水素を高温で反応させ CO と H を作る従来方法に対して、太陽電池や風力で作られる電気を使って、水を電気分解して、水素ガスを製造する方法が WE-NET (World Energy Network) で推進されている。

5.2.3 ゴミ発電・超臨界水の利用

ゴミを直接燃やして、その熱を利用するのが素朴な方法であるが、周知の様にダイオキシン問題を抱える昨今燃焼方法の改善が図られているが、更なる改善の必要がある。近時超臨界水によるゴミ処理が開発されつつある。超臨界水とは水を密閉容器内で加熱し $400^\circ C$, 300気圧程度にすると水は液体状態と異なり、気体分子と同じ運動エネを持った活性な流体となる。この容器内でゴミを綺麗に燃やす技術である。

何れにしても、ゴミ焼却時の熱を利用して発電に繋げる方策である。

5.2.4 バイオマス

生物、特に植物は光合成で自ら作った太陽エネを保有

表5.2 燃料電池の種類と特徴¹⁶⁾

	磷酸型	熔融炭酸塩	固体電解型	固体高分子型
電 解 型	磷酸水	LiNa, LiK 炭酸塩	ジルコニア系	高分子膜
作動温度	200℃	650-700℃	900-1000℃	70-90℃
燃 料	天然ガス メタノール	天然ガス	天然ガス	天然ガス メタノール
発電効率	35-40%	45-60%	45-65%	30-40%
特 徴	商用化	高発電効率	高発電効率	低温, 高エネルギー密度
				移動用動力源

している。これらを熱分解、化学分解させて、アルコール、メタンガス、エタノールなどを生成し、燃料として用いる方法である。かつて、ブラジルでサトウキビから代用アルコールの生成に成功して、話題となった。

これらの燃料を燃やすと当然 CO_2 が発生するが、元々樹木が吸収した CO_2 であるから、これを新たに植物に吸収させれば、大気中の CO_2 は増えない。この観点からは、樹木の重量当たりのエネルギーは石油の 1/3 以下とは言え、 CO_2 の自動的循環が図れるのは魅力である。

5.3 自然エネルギー(循環型エネルギー)の利用

前節で述べた発電は主として一次エネルギーとして有限な化石燃料に頼ったものであるが、これ以外に地球上には循環型エネルギーとして、水力、風力など多くの資源が存在する。それらエネルギーの大きさがどの程度のものであるかを表 5.3 示す。

我が国の水力は既に殆ど開発済みである。

隣の中国は包蔵水力 3 億 kW と言われ、現在開発中の三峡地区はその 10% 前後であろう。

太陽から地球へ到達するエネルギーは凡そ 1 kW/m^2 とされているが、天候、緯度により大幅に変動する。

その熱は蓄熱材を介して、広く給湯システムなどに利用されている。

光は Si 半導体素子などを使用した太陽電池システムによって発電が可能である。

即ち、図 5.5 に示す様に、半導体素子に光を当てると、電圧が生じる原理を利用したもので、1950 年宇宙船の電源として採用された。

1986 年、四国西条地区で、1000 kW の発電に成功しているが極めて高価で、当面は山奥、離島の独立電源として用途があろう。電池からの出力は直流であるから、現系統との連繫には、交流への変換が必要である。太陽電池素子の変換効率が 15% で、電池自身も現在高価であるので、今後の改善研究が期待される。

その暁には、時速 100 km を出せる様な太陽光発電装置を持った Solar Car の経済的実現も可能になるだろう。

更に、終日快晴の宇宙空間で太陽光発電を行ない、これを Micro-Wave で地上へ送電する事も可能になるかも

表5.3 自然エネルギーの利用^{11,12)}

資 源	エ ネ ルギ	備 考
水 力		包蔵水力殆ど開発済み
太 陽 光 熱	平均 1 kW/m^2	200-5,000 nm 波長領域
風 力	0.66 kW/m^2 10 m/s	$E = 0.00066 A v^3$
波 力	13.5 kW/m 沿岸	$E = 0.96 h^2 T L$
潮 力	0.5 W/m^2 潮流 10 m/s	海流
海洋温度差	20 kcal/kg 20 C 温度差	$E = 1.167 Q dT$
地 熱	500 kcal/kg 500 C 熱水	地殻から汲み上げ
潮 汐		潮の干満
バイオマス		

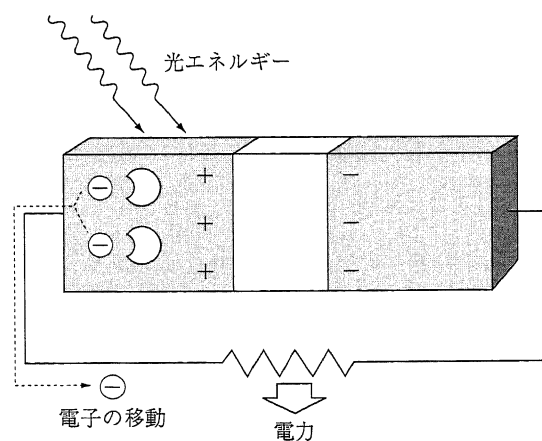
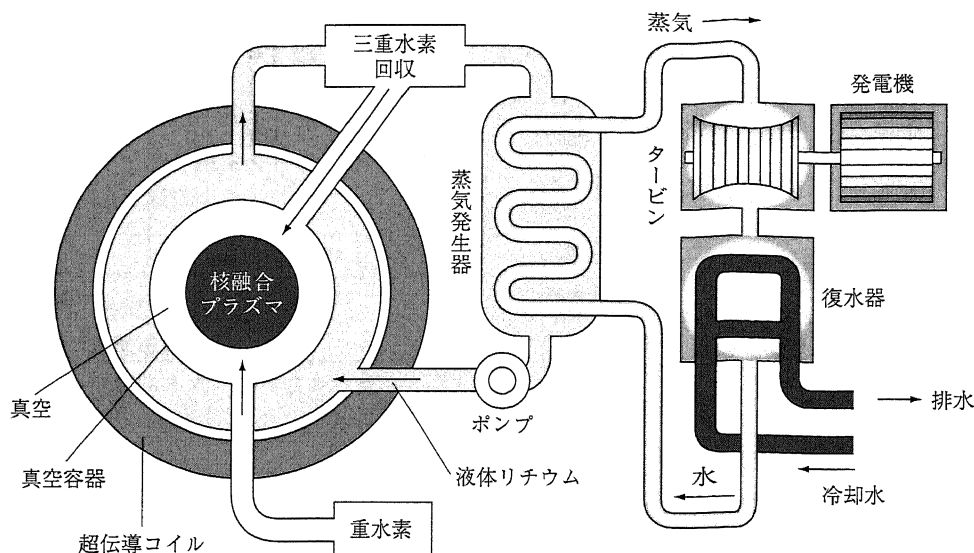


図5.5 太陽電池の原理

知れない。

風力、波力、潮力、海洋温度差も太陽熱によって生じるものであるが、最も身近なものとして、風力がある。しかし、天候に左右され利用率は凡そ 20%、風力のエネルギーは風速の 3 乗に比例するので、10 m/s 以上の風が好ましく、海岸、離島、山頂などが風力発電の設置点となる。

既に Denmark、独、米などで早くから可成りの規模の発電が行なわれている。

図5.6 トカマク式核融合炉^{11,12)}

日本でも一基300-500 kW 程度のもので、竜飛岬、八丈島など設備合計150 MW ほどが既に実用化されている。

潮の干満は太陽、地球、月の相対位置により一日に2回発生するので、低緯度地区で、立地条件が揃えば発電所となる。フランスの地中海に面したランスで潮汐発電が実用化された。

最後に、地熱がある。地殻から200℃以上の熱水を汲み上げ、フロンなどの低沸点媒体を気化させて、これをタービンに送り込むもので、世界の火山帯の諸処で開発されている。我が国でも葛根田など全体で約500 MW が利用されている。

5.4 新エネ変換の開発

今後期待される新しいエネ源から電気を得る方法について触れよう。

原子力の利用は基本的に Einstein の法則に依存している。

$$E=mc^2$$

但し、E：エネルギー

m：質量、c：光速

即ち、物質はその質量に応じたエネを保有していて、質量1 kg の物質は 9×10^{16} J (石油200万 t) のエネを保有している。

核子の安定性から見ると、質量数60程度の鉄は最も安定であるが、質量数の高いU は中性子と衝突して分裂し、その際エネを放出する。他方、質量数の低いH、Heなどは融合し、その際エネを放出する。

前者が現在使用されている原子力発電時の炉内での過程である。後者が今後期待される核融合発電である。

5.4.1 核燃料の循環利用

現在、原子力発電で主流の軽水炉（沸騰水型と加圧水

型）では天然ウラン ($^{235}\text{U}_{92}$ が0.7%，残は $^{238}\text{U}_{92}$) を濃縮して、 $^{235}\text{U}_{92}$ を4%含有する燃料棒にして利用している。これに中性子が衝突すると核分裂して、その際 $^{235}\text{U}_{92}$ 1 g 当たり 8.2×10^{10} J のエネを放出する。これは石炭3.3 t にも相当する。

この間、自らは燃えない天然ウラン中の $^{238}\text{U}_{92}$ が高速中性子の衝突を受けて、燃える $^{239}\text{Pu}_{94}$ に転換される。このプルトニウムを使用済み燃料棒から回収し、ウランと混ぜて再使用する事が出来る。即ち両者の二酸化物粉末を混ぜて作られた MOX (Mixed Oxygen Fuel) 燃料として軽水炉で使用するのがプルサーマル方式である。

他方、天然ウラン中の $^{238}\text{U}_{92}$ を $^{239}\text{Pu}_{94}$ に最初から積極的に転換出来る様に設計された炉が増殖炉である。即ち、MOX 燃料の周りに $^{238}\text{U}_{92}$ を配列した燃料棒を使用する。炉心では、 $^{239}\text{Pu}_{94}$ が高速中性子により核分裂するが、その際発生する高速中性子が $^{238}\text{U}_{92}$ に衝突して、これを燃える $^{239}\text{U}_{94}$ に転換増殖する方式である。

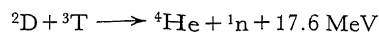
我が国でも常陽炉で研究が行なわれ、やがて実用化が期待される。夢の原子炉と言える。

この様にすれば、天然ウラン源を数倍のエネ源にして利用出来るとされている。

尚、増殖炉では高速中性子を効率よく使用出来る様に、熱伝導性が良く、中性子を減速させ難いNaが減速材に使用される。

5.4.2 核融合

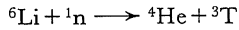
核融合反応は太陽での反応と同じで、下記の如くである。



但し、D：重水素 (Deuterium),

T：三重水素 (Tritium)

Dは海水中に含まれ、地球上には多量存在する。Tは天然に存在しないので、下式の反応を利用して、Liに中性子を当てて、融合炉内で人工的に生産する。



所で、この様な反応を起させるにはD, Tを1億℃の状態、1秒間閉じ込める必要がある。これに耐えるような容器を作れないので、磁界を使ってプラズマを炉心中央部に閉じ込める事が一方法として考案されている。所謂図5.6に示すトカマク方式である。即ち、プラズマの周囲を液体Liで満たし、これに融合反応で生じた中性子を当てて、 ${}^3\text{T}$ を作り出すと同時に、液体Liが受けた熱を利用して蒸気を発生させる仕組みである。21世紀の後半以降に実現が期待される。

5.4.3 MHD (Magneto-Hydro-Dynamics)

図5.7の如く管路へ化石燃料を2000℃以上の高温電離状態のプラズマ状ガスにし、これを数百-数千 m/s で流入し、管路の上下方向に磁界を掛けておくと、管路の前後方向に電気が発生する。Fleming の右手の法則によるものである。プラズマは気体原子が電子とイオンに分かれた状態のことで、これの電気伝導度を上げる為、Cs (セシウム)などを添加する。現在、研究段階である

ま と め¹⁸⁻²⁰⁾

化石燃料の有限性、これらを電気エネに変換するときの環境問題を考えるとき、古代人類が考えた四大元素は今日でもそのまま通用する重要な元素であることが良く分かる。

他方で、我々が日々使用している幾多の家庭用電気製品に眼を向けると、一品一品が生まれるまで、そして使用中、又廃棄する時にもエネが消費されている。

近時、LCA (Life Cycle Assessment) 手法によって、製品の生涯を通じてどれだけエネが消費されるか、それに伴って環境にどれだけの負荷を掛けているかを把握する技法が検討されつつある。

一例として、エアコン一台の生涯中のエネ消費量を図6に示す。使用中の消費エネが圧倒的に高いが、製造者のみならず、製品使用者も製造時、廃棄時に消費される

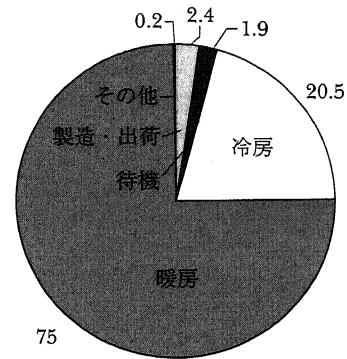


図6 エアコンのLCAの各段階での使用エネ (%) ²⁰⁾
(全30000 Mcal)

エネの大きさに充分留意する必要がある。本年4月から家電製品リサイクル法が施行された。環境問題とエネ問題が身近に迫っていることを痛感せざるを得ない。

この様に考えて来ると、科学技術の発展により人間は自分達の生活を豊かにした。反面、大きな負債を背負った事になる。

しかし、これを克服するには従来と異なる観点からの科学技術が要求される。

特に工学に携わる者はエネ問題解決の最前線に立たねばならないと思われる。

末筆ながら、NEDO 理事長 松井秀行氏、JCH 乾昭文博士、東芝 PIC 池田久利博士、青木 努氏、鈴木克巳博士、電機工業会 高橋 潔氏には貴重な資料や助言を頂いた。衷心より御礼申上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) NHK : 世界四大文明展ガイド 2000
- 2) C. Eckold: Kraftmaschinen 1. 1996 Deutsches Museum
- 3) K. Maue: Kraftmaschinen 2. 1996 Deutsches Museum
- 4) J. Teichmann: Elektrizitaet 1996 Deutsches Museum
- 5) 川口芳弘 : あらすじ電機技術史 国士舘大学工学部紀要 第34号 2001
- 6) 矢野恒太郎記念会 : 日本の100年 改訂第4版 2000
- 7) 地球人間環境フォーラム : 環境要覧 2000/2001 2000

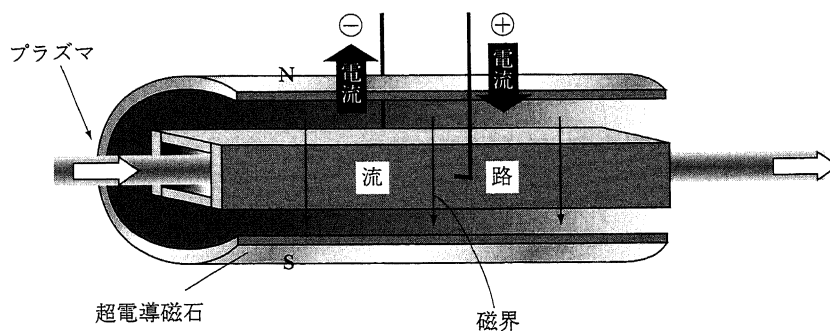


図5.7 MHD 発電の原理

- 8) 省エネセンター：省エネ便覧 2000
- 9) 安藤淳平：環境とエネ 東京化学同人 1995
- 10) 今中利信他：環境・エネ・健康20講 化学同人 2000
- 11) 電気学会：エネルギー工学序論 1996
- 12) 電気学会：エネルギー工学概論 1996
- 13) 機械学会：(C7) エネルギー機器・システム 1991
- 14) NEDO：ニューサンシャイン計画 1999
- 15) NEDO：太陽・風力エネルギー利用技術
- 16) NEDO 他：固体高分子型燃料電池 2000
- 17) 工技院：“ニューサンシャイン計画におけるエネルギー利用・環境技術プロジェクト”工業技術特集号 Vol. 41. 7. 2000
- 18) 工業調査会：LCA のすべて 1999
- 19) MITI/NEDO/JEMAI: LCA プロジェクト
- 20) 岩舟由美子：暮らしの中のエネ 電気学会 2001