

## 特集

## 原子力エネルギー

## 原子力エネルギーの多目的利用

## Process Heat Application of Nuclear Energy

青地 哲男\*

Tetuo Aochi

## 1. はじめに

国内に有力なエネルギー資源を持たず、エネルギー供給のほとんどを海外に依存している我が国は、代替エネルギーの開発を含めてエネルギー資源の多様化が強く要請されている。

原子力は準国産エネルギーとして最も大きな期待が寄せられており、実際に、原子力による発電は、総発電の約2割を占めるに至った。しかしながら、現在のところ、原子力の利用は電力分野のみに限られており、総エネルギー需要の約3%を占める非電力分野においては、未だに、その3%を輸入石油に依存している。

原子力を発電だけでなく非電力分野の熱源にも利用する構想—原子力の多目的利用—の実現をはかることは、エネルギー政策上はもとより環境問題の上からもその意義は極めて大きいものがある。

## 2. 多目的利用の高温ガス炉

わが国のエネルギー消費量を温度領域別に示すと図-1のようになる。このうち、900°C以下の熱エネルギーは全体の約3%を占め、また、1,300°C附近の高温領域の熱源が大量に必要な鉄鋼業でも、高温還元ガス利用による直接製鉄技術が実用化されるならば、その必要温度は900°C以下にすることが可能となる。さらに、新エネルギーとしての石炭のガス化・液化、水の熱化学分解法による水素製造なども、900°C程度の温度で可能である。なお、図-1では、500°C以下の熱エネルギーは全体の約1/2、200°C以下では約1/3となっている。

一方、原子力を産業用熱源に利用できる程度は、原子炉内で発生する核熱を、炉外に取り出す冷却材の原子炉出口における平均温度でさまる。現在、世界的に実用化ないし開発されている原子炉の冷却材出口温度は、軽水炉、重水炉で約280°C、液体金属冷却高速炉

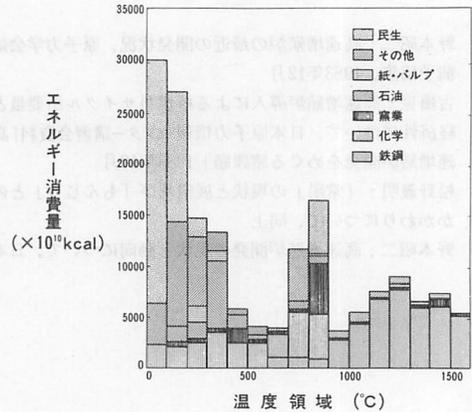


図-1 温度別エネルギー消費量 (昭和55年度)

炭酸ガス冷却炉で約540°Cであるのに対し、高温ガス炉は約750°C(実験炉では950°C)である。これらの原子炉は、いずれもこの冷却材を用いて蒸気を発生させ発電を行っているので、発電と併行して産業部門に蒸気を供給し、それぞれ、低温、中温、高温領域への利用に役立たせることができる。

高温ガス炉は、燃料の被覆材に炭素および炭化ケイ素を用いる被覆粒子燃料、大量の黒鉛を主体とする減速材および炉心構造物、ヘリウムガスの冷却材で構成されるため、種々ある原子炉の中で最も高温の熱が取り出せる。欧米での運転実績から次のことが認められている。

(1) 軽炉水(約32%)より高い発電効率(約39%)。熱公害、冷却水量が少ない。(2) 炉心冷却材喪失のような事故を想定しても、炉心温度の上昇は著しく緩慢で対策が容易。(3) 一次冷却系材器、配管への放射性物質の沈着量が少なく、従業員の被ばく量も軽水炉と比べて2けたほど小さい。(4) 放射性廃棄物の発生量が軽水炉と比べ1けた少ない。(5) トリウムを使用するのに最も適した炉型で、核燃料資源の多様化に貢献できる。

\* 日本原子力研究所東海研究所副所長

〒319-11 茨城県那珂郡東海村

以上のように、高温ガス炉は、個有の安全性、環境安全性にすぐれ、かつ1,000°C程度の高温の熱エネルギーを取出して多目的利用の図れる唯一の原子炉である。

### 3. 高温核熱の利用形態

1,000°C程度の多目的高温ガス炉システムが実現した場合の核熱利用形態の一例を図-2に示す。900°C程度の高温ヘリウムガスの供給先は大きな吸熱反応を伴うものが望ましいので、メタン等の水蒸気改質；石炭の水蒸気ガス化；石炭のガス化や液化に必要な水素の製造；水の熱化学分解による水素の製造法等が対象となるが、いずれにしても燃料・原料などの製造に必要な熱エネルギーとして直接利用され、一方、高温蒸気はこれらの産業が必要とする電力を賄うために発電系に供給される。この形態は、次のユーザーに燃料・原料および電力を供給する2次エネルギーセンタ的構想を示したもので、核熱の産業利用上問題となる。原子力施設と一般産業施設との立地(隣接か遠隔か)；熱源供給の経済性、安全性、安定、確実性(高稼働率を含めて)の確保に対する一つの提案となっている。しかし、核熱の産業用利用は、先ず産業分野で使われている化石燃料によるボイラー(発電と熱源用蒸気)の代替から始まるとの観点から、電気、高温蒸気供給(Co-Generation)型や、小型(熱出力で250MW程度)のモジュール炉、ケミカルヒートパイプ(後述)にも関心が高まっている。

### 4. わが国における開発

わが国では、昭和42年頃から、鉄鋼業における環境問題の解決、原料炭依存からの脱却といった観点から、核熱エネルギーの製鉄法への利用が検討された結果、冷却材出口温度1,000°C程度の高温ガス炉の必要性が提唱されるに至った。これを一つの契機として、日本原

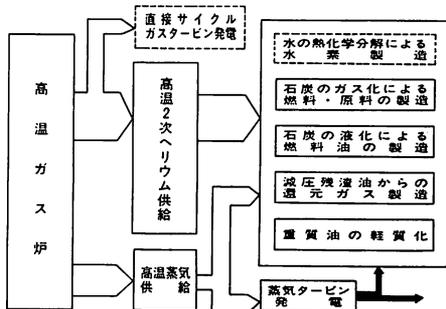


図-2 高温核熱の利用形態(例)

子力研究所は44年に多目的高温ガス炉の研究に着手し実験炉の建設を当面の目標として、関連機関の協力を得て所要の研究開発を展開して来た。

#### 4.1 実験炉の設計、研究開発

これまでの設計研究で固められた実験炉の概念は、図-3に示す低濃縮ウラン被覆粒子燃料の黒鉛ブロック型燃料要素(ピンインブロック型)を、54個を1段として8段積み重ねて炉心(直径2.75m、高さ5.6m)とし、この周囲に黒鉛ブロック反射体を配した構造となっている。図-4に示すように冷却系は2ループあり、圧力容器の底部にある2本の2重管のそれぞれ外管から冷却材が入り、炉容器側壁を冷却しながら上昇、炉上部で流量配分されて炉心部に入る。ここでは、冷却材は燃料棒と燃料孔との環状間隙(約5mm)を下向きに流れて1,000°C程度に加熱され、プレナム部から2重管の内管を通して冷却系につながる仕組みとなっている。

また、関連分野の主要な成果は次のとおりである。

1) 燃料・材料被覆粒子については、1,350°Cの高温下でも健全な粒子を国産し得る見通しを得たほか、黒鉛についても実験炉に使える銘柄(黒産品を含む)を選定した。また、耐熱構造部材としての金属材料については、950°C運転下で使用する合金を開発(ハステロイXR)した他、より高温に耐える合金の研究にも着手

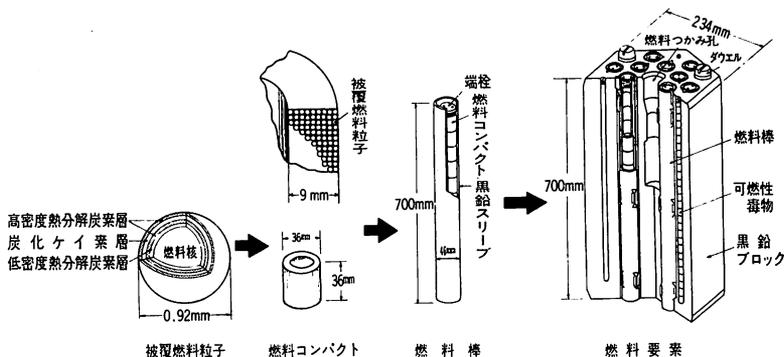


図-3 実験炉の燃料体構成

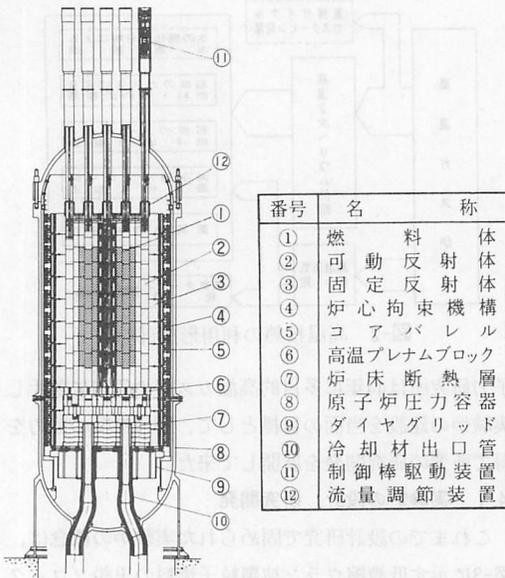
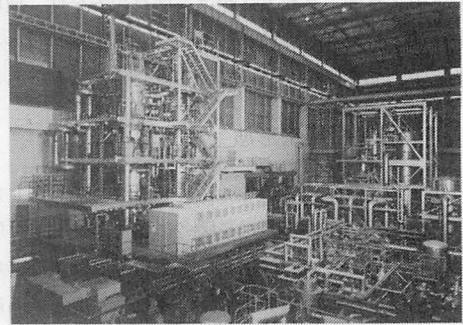


図-4 実験炉の炉体構造

した。以上の諸材料については、炉圧力容器鋼のCr-Mo鋼とともに、実験炉での使用条件を満たすための確認試験を続けている。また、特に燃料の高温・放射線下での健全性を確認するため、材料試験炉で、1,000°Cのヘリウムを流しながら炉心で照射を行う照射用ガスループ(UGL-1)を開発、すでに1万時間以上の運転を続けている。

2) 炉工学 高温ヘリウムの伝熱流動特性の解明や高温用熱中性子検出器、温度計の開発といった実験炉に不可欠な成果が得られている他、より高精度の炉物理データの取得と、燃料体の量産経験を得るため、実験炉燃料による臨界実験の準備(臨界集合体SHEの改造と実験用燃料の量産)を進めている。

3) 高温構造物・機器の開発・実証試験 実験炉の主要部のモックアップ試験のためHENDEL(Helium Engineering Demonstration Loop)計画が進められている。すでに、40気圧、1,000°Cの高温ヘリウム(電気加熱)を毎秒4kg供給する本体部と、4種の試験部のうち1番目(燃料体スタック試験)とは、それぞれ、57年3月、58年3月に完成、本格的試験を進めている。一方、2番目の試験部(炉床構造)は61年3月完成を目前に製作中、3番目(炉内流量)、4番目(中間熱交換器などの高温熱輸送機器試験)についても調査検討が進められている。HENDELの規模、圧力、温度は世界の最高水準を行くもので、国際協力を進める上で重要な役割を果しつつある。



第1試験部 本体部

写-1 HENDEL

## 4.2 熱利用関係

通産省工技院では、実験炉に接続する直接製鉄パイロットプラントの建設を目標に、昭和48年から6ヶ年計画で大型プロジェクト「高温還元ガス利用による直接製鉄技術の開発」の第1期計画を開始、その実施機関として「原子力製鉄技術研究組合」(ERANS)が設立され、耐熱合金、断熱材の開発；中間熱交換器ループ、還元ガス製造装置の試作と試験運転；パイロットプラントの概念設計などを進め、56年に所期の目的を達成して終了した。これらの成果は原研に逐次移管され、その活用が図られている。

高温ガス炉と熱利用系を組合わせた核熱利用システムの研究は、各研究機関や産業界で進められているが調査研究の段階である。原研では、水の熱化学的分解法による水素の製造に関する基礎研究を進める一方、多目的高温ガス炉の社会的有用性を明確にし、実験炉の早期着工に資するため、核熱利用システムに関する調査を継続的に行っている。これまでの検討から、実験炉に接続すべき利用系として、図-5に示すような基本構成(案)が、今後の検討素材として提案されるに至った。これは原子炉の温度・圧力条件との対応、プロセス側の特性、原料の入手、生産物の利用範囲などから、核熱利用の将来の実用化のための基盤技術として水蒸気改質システムの実証が充分有用と考えられるからである。さらに、原料の入手、製品の始末を考えると、メタンの水蒸気改質とメタン合成を閉じたループにすることが望ましく、これは、いわゆるケミカルヒートパイプとなるので、その特性を充分把握しておくことは、実験炉としては意義あるものと考えられる。

## 5. 海外の動向

現在、高温ガス炉の開発に実績を持ち、積極的に取り組んでいるのは、米国と西独である。(表-1参照)

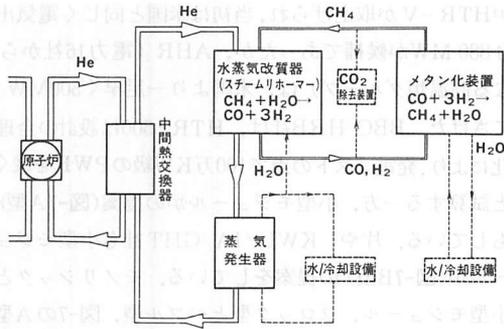


図-5 実験炉用蒸気改質システムの基本構成(案)

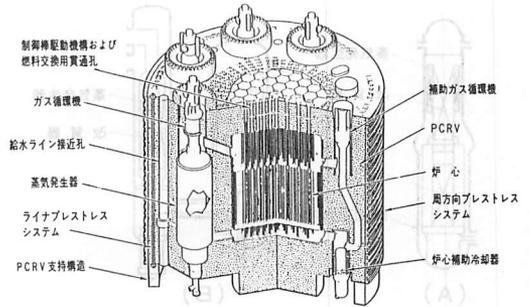


図-6 核熱蒸気発生システム

5.1 米 国

まず、ピーチボトム炉を実験炉として建設し、1974年には所期の目的を達して運転を終了した。次の原型炉は、わが国の実験炉のヒナ型となったブロック型燃料要素(但し、マルチホール型)を用いて設計された。

このフォート・セント・ブレイン炉は、1974年の臨界後、各種のトラブルが続き、長期間低出力運転を余儀なくされたが、炉心部の改修などを経て1982年には100%出力営業運転が許可された。この間、得られた貴重な資料は、高温ガス炉発電所の優秀性を実証するものとなっている。

次の段階として、蒸気供給発電用実証炉を建設するリードプラント計画が、ガス冷却炉協会(GCRA：電力会社、核熱ユーザー会社で構成)を中心に鋭意検討

が進められている。この炉はフォート・セント・ブレイン炉と同じくPCRV(プレストレストコンクリート製炉容器)のモノリシック(一体)構造となっており(図-6)、しかも原子炉出口温度を下げた安全余裕を増し、許認可手続きを早め、1990年代半ばの運開を狙ったものである。最近になってもGCRAは、需要の点から、熱出力を2,240から1,000MWに下げた場合と、熱出力250MW程度(燃料はペブル、ブロック型の2ケース)の小型炉(鋼製容器)を複数基設置するモジュール炉システム(MRS)の場合の両者を、併行して検討し、その結論を来秋までに得ることと方針を変更した。MRSの概略を図-7に示す。MRSは従来のモノリシックの大型炉と比較して、ユーザー側需要への対応、建設期間の短縮、稼働率の向上をはかることができる上、安全性、経済性にもすぐれた設計とすることができると言われ

表 1 世界の高温ガス炉の主要諸元

	原子炉名	用途	熱出力 (MW)	電気出力 (MW)	冷却材出口温度 (°C)	2次系蒸気湿度 (°C)	定格運転開始 (年)	備考
西 独	AVR	発電用炉 実験用炉	46	15	950	505	1974	
	THTR	発電用炉 原型用炉	750	308	750	530	1985	建設中
	HTR-500	蒸気併給 発電実証炉	1250	500	700	525		計画検討中
	PNP-500	核熱利用 原型用炉	500	—	950	(900)*		設計中
米 国	Peach Botoom	発電用炉 実験用炉	116	40	728	538	1967	運転終了
	Forst St Vrain	発電用炉 原型用炉	842	330	785	538	1982	
	リード・プラント	蒸気併給 発電実証炉	2240	350~860	689	538		計画検討中
日本	実験炉	核熱利用 実験用炉	50	—	950	(905)*		設計中

\* 2次系ヘリウム温度

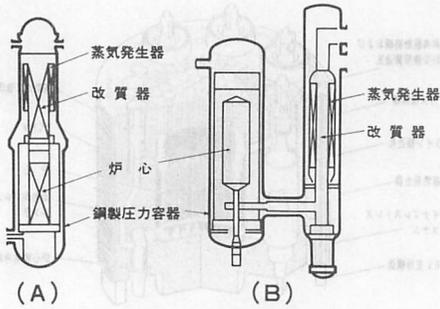


図-7 小型炉(モジュール炉)システム：MRS

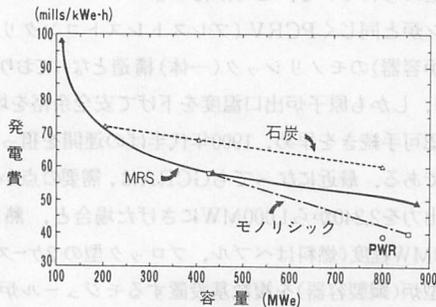


図-8 発電費の比較

ているが、今後の検討にまつところが多い。経済性の検討の一例を図-8に示す。

5.2 西独

西独は、原子炉の高温化という点では、図-9に示すようなペブルベッド型と呼ばれるユニークな炉心構造の開発で先鞭をつけた。1974年からは、炉心出口で世界最高の950℃に達している。1971年に着工された原型炉THTRは、ペブルベッドのモノリシック型であるが、西独特有の許認可制のもとで、基準強化に伴う追加安全要求のため、大幅な工期遅延、建設費の膨張が生じ、その資金調達が難行したが、昨年4月に見通しがつき、昨年9月臨界、1985年に営業運転に入る予定となった。THTRの後継プロジェクトとして蒸気併給発電用実証

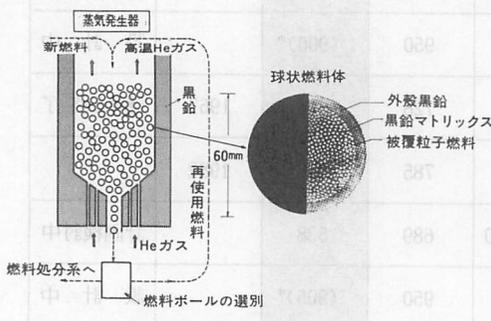


図-9 AVRの炉心概念

炉HTR-Vが取上げられ、当初は米国と同じく電気出力880 MWが候補であったが、AHR（電力16社からなる高温炉グループ）は、米国より一足早く500MWにさげた。BBC/HRB社は、HTR-500は設計の合理化により、発電コストの点で100万KW級のPWRを凌ぐと試算する一方、小型モジュール炉の提案(図-7A型)もしている。片や、KWU/IA/GHT社も小型モジュール炉(図-7B型)の提案をしている。モノリシックと小型モジュール、ブロック型とペブル型、図-7のA型とB型、これらの比較評価の行方には大いに注目しなければならない。

以後の計画としては、核熱による石炭、褐炭のガス化を主目的とするPNP計画が長期的に推進されている。これに関連し、メタンの分解・合成反応を利用したヒートパイプ技術も開発中であり、パイロットプラント(EVA/ADAM)による試験も行われている。

5.3 ソ連

核熱プロセス利用を主目標としたペブルベッド型、低濃縮ウラン使用の高温ガス炉の開発を進めており、実験炉VGR-50(熱出力136MW)の設計は完了、コンポーネント製造準備中と伝えられる。また、アンモニア製造プラントを熱利用系に接続する原型炉VG-400(核熱併給発電炉)の設計研究も進行中、さらに同じく原型炉VGR-500(核熱供給専用炉)の設計に着手したとのことである。

6. 国際協力

原研は、自主技術開発の成果をバーゲニングパワーとして、経験豊富な西独及び米国との国際協力をさらに積極的に展開し、資金、要員の効率的活用を図るとともに、開発期間の短縮などに努めることが必要であると考え、図-10に示すような国際協力を進めている。

まず、西独のユーリッヒ原子力研究所との間の協定のもとでは、燃料、黒鉛、耐熱金属、計装、コンポーネント試験、FP沈着、安全性の特定研究課題を中心に、共同実験を含む協力が進められている。なお、本協力活動にわが国の関連企業も包含させるため、「高温ガス炉に関する技術協力契約」が原研と民間10社間で締結されている。その他、PNP計画の一環としてGHT/IA社が建設を進めている中間熱交換器を中心とする大型高温機器試験ループKVKと、前述した原研のHENDELとの間で、協定が新たに締結された。

次に、米国との間では、高温ガス炉の安全性情報交換会議が過去3回、両国で交互に開催されている。また、

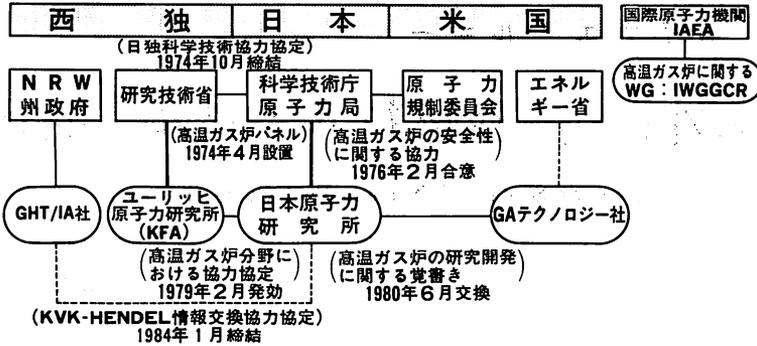


図-10 高温ガス炉の開発に関する国際協力

GAテクノロジー社との間の情報交換協力のための覚書の一つのステップとして、米国エネルギー省 (DOE) と原研との間でより包括的な協力協定を締結する準備が進められている。さらに、米国MIT主導の高温核熱の生産と利用戦略に関する国際解析計画 (米, 独, 加など参加) にも最近参加することとなった。

この他、IAEAには、高温ガス炉に関する情報交換のためのワーキング・グループ (IWGGCR) が設置されており、独, 米, 日, ソ連などが参加している。

さらにIAEA協力研究計画: CARES—エネルギー供給における新型動力炉の役割 が新に発足しようとしており、わが国は他の炉型とならんで高温ガス炉にも関心と協力を表明している。

### 7. おわりに

昭和57年6月、原子力委員会が決定した「原子力開発利用長期計画」では、原子炉の多目的利用に関して

「1990年ころの運転開始を目的に実験炉を建設する」と、「利用系技術の開発・実証に活用し得るよう汎用性のある利用系プラントを実験炉に接続する」ものとしている。核熱の多目的利用システムの開発にとって、炉の開発と利用系の開発は車の両輪のようなものである。われわれは、利用系技術開発との連携を一層強め関係諸機関の一層の協力を得て、国の方針に則り、実験炉の早期建設をめざし努力する所存である。

### 参考文献

- 1) 「多目的高温ガス炉開発の現状」原研, 1983年
- 2) 青地他: 「核熱利用技術の動向」原子力工業 29(9), 25 (1983).
- 3) 第3回エネルギー総合工学シンポジウム (特集) —核熱利用の拡大に向けて— 議事録 季報 エネルギー総合工学 6(3), (1983) エネルギー総合工学研究所

### 話の泉

### 海底湧出資源の回収

米国カリフォルニア州のサンタバーバラ海峡では、海底から湧出する石油と天然ガスによる海洋汚染に悩まされてきた。アトランティック・リッチフィールド社 (Atlantic Richfield Co.) は、この対策として、大型の捕捉槽を海底の湧出口に沈めて、石油と天然ガスの回収に成功した。

この捕捉槽は、厚さが約1cmの鉄板でできた一辺が、約30mのピラミッド形で、頂部には高さ15mの分離塔がある。湧出物はこの分離塔に集められて、石油とガスに分離される。同社はこの捕捉

槽を2個並べて海面下約70mの湧出口に被せた。これにより自然湧出部の半分 (約2200ヘーベ) を覆うことができた。

この捕捉槽は1982年10月に据付けられて以来、月間約100バレルの石油と80万<sup>3</sup>mの天然ガスの採取に成功し、資源の回収と海洋汚染の防止に威力を発揮している。

(Mazingira, Vol. 7, No. 4, pp. 56-65, 1983年より抜粋) (Y生)