

THE ROLE OF NUCLEAR POWER IN KOREA'S ENERGY FUTURE



U. YOUNG PARK

(朴宇亨 · RESEARCH SCIENTIST,
BATTELLE MEMORIAL INSTITUTE)

SUMMARY

One of the most severe problems facing developing countries such as Korea is energy supply and self sufficiency. As in the case of Japan, Korea must plan to achieve energy independence in order to progress economically, and indeed to survive as a nation. Currently, the development of nuclear power appears to be the most viable method for Korea to meet her ever increasing need for energy. Problems exist, however. In order to be free of supply interruptions and dependency on others, major segments of the nuclear fuel cycle must eventually be developed in Korea. To achieve nuclear energy independence several goals seem necessary: (i) Fuel resources—secure arrangement—secure long-term U_3O_8 supply, (ii) Fuel elements—develop indigenous uranium and eventually mixed oxide fuel fabrication capability, (iii) Resource conservation—develop indigenous reprocessing capability, (iv) enrichment—secure long-term arrangements and eventually develop enrichment services, (v) Hardware & spare-parts—develop indigenous industry for piping, pumps, etc., (vi) Waste disposal—secure arrangements or develop waste disposal capabilities, (vii) Education—plan for needed engineers, scientists, and reactor operators. Korea's rapid past economic growth indicates

that such a program should be possible in the long-term. In the mean time, close cooperation will be required between Korea and the U.S., Europe and IAEA. The recent slowdown in the U.S. nuclear program should make enrichment services available for countries such as Korea.

As we all know, Korea's energy resources are very limited; no oil and little coal. Other alternative energy sources—solar, wind, tidal, etc.—may contribute a small part to the whole energy picture, but are unlikely to play a major role in Korea. That is, these "soft-science" energy sources depend upon natural phenomena whose energy intensities are rather weak and thus not entirely suitable for use in mobilizing current energy intensive societies.

Thus, the only way for Korea to survive as a modern nation is to use "hard science energy sources" such as nuclear energy. As we use many other hard science products, fiber, plastics, etc., to support our population, we can meet our energy demand by using the "hard science" energy from fissionable materials. Uranium and thorium are generally useless metals by themselves, unless used to produce energy. Human technology is creating energy from these otherwise non-usable metals.

Currently, development of nuclear energy in the United States is slowing down because of political and social situations. (1) Probably the United States is the only country in the world in which the growing trend of nuclear energy is not taking place. The reason for this seems to be that the U.S. still has a vast amount of energy resources, especially coal. Therefore, the U.S. perception of energy and its role in national security is somewhat vague. In the not too distant future, however, the U.S. will probably face rather severe energy problems as oil import costs weaken the economy and the implementation of alternative sources of energy are delayed due to environmental considerations.

Because of the recent slow-down in nuclear energy implementation in the U.S., the U.S. nuclear industry has excessive capacity. Now is a good time to take advantage of this situation for bargaining for nuclear equipment and services. Regardless of this situation, nuclear systems, or any energy production facilities, are expensive and the purchaser is largely dependent on suppliers, although perhaps to a lesser degree than with oil. Therefore, in order to be free of supply dependency and interruptions, major segments of the nuclear fuel cycle must eventually be developed in Korea. To achieve such nuclear energy independence, several goals appear necessary:

1. fuel resources— U_3O_8 thorium
2. fuel element production—uranium and/or MOX fuel fabrication
3. reprocessing capability—fuel recycle
4. enrichment capability
5. power plant equipment—major and minor parts
6. nuclear waste disposal
7. personnel requirement—engineers, scientist and technicians.

Following is an analysis of each objective including possible approaches in satisfying these objectives.

1. FUEL RESOURCES

Long-term supply of uranium one of the most important factors for nuclear energy. If nuclear energy is going to have a problem, it may be the shortage of the uranium fuel. Therefore, the recycling of uranium fuel and

consequent use of MOX fuel, which will be discussed later, are very important. Like oil, the uranium resources are limited. In a recently published article², the world uranium estimates of reasonably assured resources and estimated additional resources are about 5 million tonnes, and speculative resources about 6.6—14.8 million tonnes. A conservative estimate of the cumulative uranium demand by 2025 is a range from 7.5 to 8 million tonnes, and possibly twice this amount, depending on nuclear growth rates. This quantity is far beyond the reasonably assured resources.

Uranium exploration in/or with foreign countries requires vast amounts of money and technical know-how. Also, knowledge of the intricate operational practices of foreign uranium companies is necessary. At this point in time Korea has to rely on foreign uranium suppliers for a while. The approach to handling this nuclear fuel supply situation is:

- a. Secure long-term U_3O_8 supplies at reasonable costs and possibly from more than one supplier.
- b. Development of other nuclear fuel sources, e.g., indigenous thorium or uranium sources.

Thorium has been given extensive attention in earlier stages of nuclear energy development. Because of a possible uranium shortage, renewed interest is currently developing in the thorium fuel cycle. Thorium is quite similar to uranium in metallurgical properties and has some advantages over uranium: it is much more abundant; some of its nuclear characteristics are somewhat more desirable. However, it is non-fissile and has to be converted to uranium in a reactor. Therefore the use of both the thorium cycle in conjunction with conventional plutonium recycle and breeder reactors should be evaluated in determining the best method of maintaining fuel supplies.

2. Fuel Element Production

This item is probably most feasible objective for Korea. Fuel fabrication is relatively simple for uranium fuel. This fuel element production will include:

- a. reconversion—enriched $UF_6 - UO_2$
- b. cladding and supporting material production

c. fuel rod fabrication

Of these, reconversion and fuel rod fabrication can be readily achieved in Korea. Zircaloy has to be imported from suppliers, but could possibly be recycled when spent fuel is reprocessed.

Another aspect of the fuel fabrication is the eventual use of mixed oxide (MOX) fuel. It is anticipated that sooner or later MOX fuel will be utilized in convention reactors or breeder reactors. Fabrication of MOX fuel is much more complicated than the uranium fuel because of the high radioactivity and the needs of a remote-handling facility. The cost of MOX fuel fabrication is thought to be at least twice of that of uranium fuel.

3. Fuel Reprocessing

Reprocessing is perhaps the most controversial subject in nuclear energy at this time, especially in the U.S. Although reprocessing could lead to proliferation it is needed by many countries in order to assure fuel supplies. The result of the recent INFCE study confirms this and also recommends the use of breeder reactors for the same reason. Reprocessing techniques generally are included into two categories—wet and dry methods. The most familiar type of wet methods is the PUREX process. The PUREX process was originally developed for military purposes during the 1940's and not basically for power generation. Because of extensive development and experience in PUREX processing, it remains the most technically advanced process. There may be a need to modify the PUREX process to more properly adapt it to the civilian power reactor program and, at the same time, to make it more diversion resistant.

Several concepts of modifying the PUREX process have been shown to be technically feasible—coprocessing, CIVEX, spiking, etc. Among these concepts, the coprocessing concepts are generally considered to be reasonably practical. Currently countries like Japan, France and Soviet Union are considering using various types of coprocessing for their future reprocessing of spent fuel.³ One form of coprocessing was initially developed at Battelle Columbus Laboratories. Its basic concept is that uranium and plutonium need

not be separated during processing or in the final product. Therefore, the process contributes to diversion resistance objectives and, at the same time, simplifies the PUREX process. Actually for a country intending to use nuclear power only for power production, there is no need to separate plutonium from uranium.

An economic analysis of the various fuel cycles by Battelle indicates that coprocessing fuel cycles are certainly competitive with conventional recycle and definitely less expensive and more resource efficient than the once-through cycle. In most countries nuclear energy will utilize some form of reprocessing and probably breeders. Currently Battelle is about to begin a fuel cycle study for Korea.

Considering her technological and industrial level small scale reprocessing appears possible in Korea in the future. In the coming years, Korea can possibly work with the IAEA and reprocessing suppliers to gradually develop an indigenous reprocessing capability while assuring that safeguards are adequately addressed. Recent information reflects that the current U.S. administration may be slowly changing its attitude toward reprocessing and breeder reactors in accordance with the result of INFCE.

4. Enrichment

Enrichment is probably the most technically difficult technology to implement in Korea. This is perhaps the last item requiring Korean development since the U.S. and other countries appear to have sufficient excess capacity. Realizing the current international mood, the U.S. is increasing enrichment service to foreign countries. But, like Japan, to be independent of other countries in fuel cycle, enrichment services have to be secured or developed eventually. A reasonable goal for Korea might be to develop an enrichment pilot plant with IAEA cooperation by the year 2,000. A number of enrichment technologies may be possible for such a facility including gas centrifuge, aerodynamic and chemical processes. The actual implementation of enrichment technology will be closely linked to the growth of Korea's nuclear program, MOX fuel recycle, thorium use and breeder reactor implementation. It is possible

의 경우 가소린H/C보다는 작고 원래의 석탄의 H/C보다는 큰 값을 가지게 된다.

석탄 액화에 있어서 화학적 처리한 300-500°C의 고온과 상당한 수소압력과 적당한 촉매의 사용을 뜻하게 된다. 300-500°C의 고온에서는 석탄분자 내에 존재하는 공유결합들이 분해되어 반응성이 강한 자유라디칼들이 형성되는데 이러한 자유라디칼들은 반응조건에 따라서 여러가지 형태의 반응을 일으키게 된다.

석탄의 열분해 반응의 일부가 이러한 자유라디칼 반응이라는 것은 1961년 Van Krevelen에 의해서 처음 제기되었다. 그후 1966년 Hill등은 Tetralin용매내에서의 석탄액화 반응이 이러한 자유라디칼과 Tetralin과의 Hydrogen Transfer반응이라는 것을 밝혔다. Tetralin과 같은 Vehicle Solvent와 석탄을 혼합한 Coal Slurry에의 수소첨가 반응이 위에서 언급한 Hydrogen Transfer반응이라는 것은 1967년 Curran 등에 의해서 발표된 논문에 의해서 확인되어, 현재석탄액화의 방법들인 SRC, EDS, H-COAL Process의 기초를 이루었다 하겠다.

이와같이 석탄액화에 대한 반응 메카니즘은 석탄화학의 연구가 그리 활발하지 않던 1970년 이전에 이미 알려졌으나, 최근에 다시 활발해진 이 분야의 연구에 의해서 재확인되고 있다.

즉 1976년 Guin등은 석탄 액화에 있어서 반응 온도, 수소압력, Vehicle Solvent의 Hydrogen Donor Activity등의 각 요인이 증가할수록 석탄분자가 더 잘게 쪼개지는 것을 발견했다. 같은 해에 Neavel 등은 Vehicle Solvent로서 Hydrogen Donor Activity가 다른 Naphthalen과 Tetralin을 사용해서 얻은 액화된 석탄의 물성을 비교하였다. Hydrogen Donor Activity가 없는 Naphthalen의 경우는 Tetralin을 사용한 경우보다 벤젠에 녹지않는 부분이 더 많이 생성된 것을 발견했다. 이상의 여러가지 사실들을 종합분석해 보면 석탄액화의 반응 메카니즘에 관해서 대략 다음과 같은 결론에 도달할 수 있다.

즉 액화온도인 300°C 이상에서는 석탄분자 내에 존재하는 C-C(80Kcal/mole), C-O(81

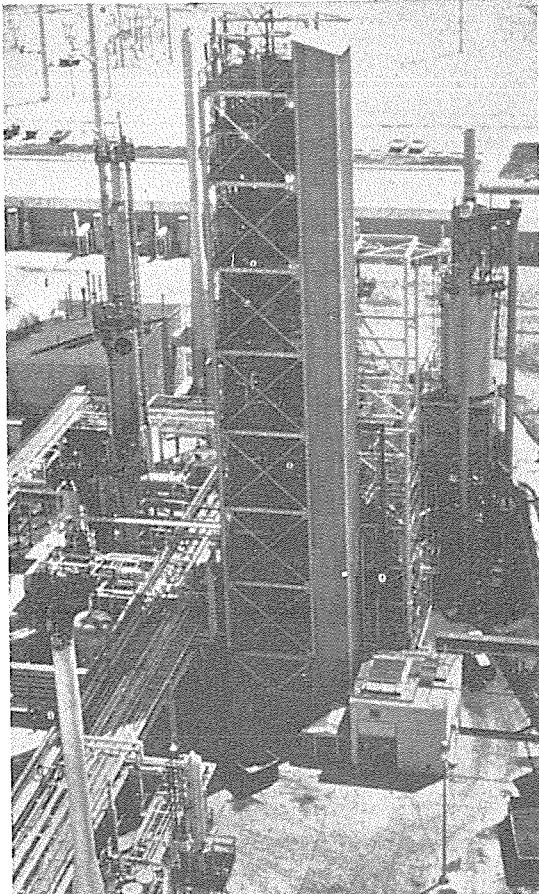
Kcal/mole)과 C-N(62Kcal/mole)등의 공유결합들이 열분해되어 반응성이 강한 자유라디칼들이 생성된다. 이렇게 형성된 자유라디칼들은 여러형태의 반응들이 비슷한 속도로 일어나게 된다. 이러한 반응이란 Hydrogen Transfer, Addition과 Fragmentation등인데 이러한 메카니즘에 의해서 위에서 언급한 Neavel의 연구결과를 설명하자면 Tetralin의 경우에 있어서는 생성된 자유라디칼들이 Fragmentation에 의해서 보다 크기가 작은 분자와 자유라디칼로 분해되고, 이 분해된 자유라디칼은 Tetralin과의 Hydrogen Transfer 반응을 통해서 안정된 분자를 형성하나, 반면에 Naphthalene의 경우는 생성된 자유라디칼이 Fragmentation과 Addition 반응을 통해서 Tetralin의 경우보다는 분자량이 큰물질을 생성하게 되어 벤젠이 녹지않는 부분이 증가하게 되는 것이다.

이상으로 석탄의 액화반응은 고온에서 공유결합의 분해에 의해서 형성되는 자유라디칼들의 반응과 또한 이것들과 Tetralin같은 Hydroaromatic Compound의 Hydrogen Transfer 반응으로 설명되고 있으나, 액화시에 첨가한 수소기체가 어떻게 액화메카니즘에 참여하고 있는가에 대해서는 전혀 언급하지 않았다. 전술한 Guin의 실험결과에 의하면 수소기체의 압력이 증가할수록 석탄분자가 잘게 쪼개어진다. 액화 반응중에 수소기체가 직접 자유라디칼과 Hydrogen Transfer 반응을 일으키는 것은 열역학적으로도 가능치 않다. 비교적 최근인 1970년 Guin등은 석탄내에 미량 존재하는 철등의 금속류가 방향족 벤젠고리를 Hydrogenation 시켜 Hydroaromatic Compound를 만드는데 촉매작용을 한다는 것을 발견했다. 이러한 발견으로서 액화반응시 수소기체는 Vehicle Solvent를 Hydrogenation시키거나, Vehicle Solvent가 없을 때는 석탄분자내의 어떤 벤젠고리를 환원시켜서 Hydroaromatic Compound를 형성하고 이러한 물질과 열분해에 의해서 생성된 자유라디칼 간에 Hydrogen Transfer반응을 일으킨다고 생각할 수 있다.

석탄액화반응은 온도와 수소압력 이외에도 적당한 촉매에 의해서도 촉진되는데 그러한 촉매의 대표적인 것이 LEWIS Acid 계통의 촉매인 Zinc Chloride이다. 이러한 촉매들과 자유라디칼과의 반응은 현재까지 알려진 것이 없으므로 액화반응중에 자유라디칼 이외에 다른 형태의 반응이 동시에 일어난다고 생각할 수 있다.

일반적인 유기반응에서 Zinc Chloride 같은 LEWIS Acid들이 Ether Linkage를 효과적으로 절단하는 것으로 미루어 볼때, 이러한 촉매들이 석탄분자내에 존재하는 Ether Linkage를 자르는데 촉매작용을 하지않나 추측할 수 있다.

이러한 절단반응에 대한 간접적인 증거로서 액화된 석탄물질중의 산성부분은 대개 다 Phenol류 인것을 들 수 있다.



〈석탄 액화 공장 : 오른쪽 아랫부분에서 들어간 석탄이 액화하여 왼쪽으로 나온다〉

이상의 논의로써 석탄액화 반응이란 고온에 의한 공유결합과 Zinc Chloride 같은 LEWIS Acid에 의한 Ether Linkage의 분해에 의해서 석탄분자가 작게 찢어진 다음 자유라디칼이나 그밖의 알려지지 않은 반응루트를 거쳐서 분자량이 작은 물질의 혼합물로 변하는 과정을 말한다.

석탄은 추정분자량이 10,000이상인 고분자로서 그 구조내에 여러가지 Functional Group들이 존재하고 어떤 불순물은 물질적 방법으로 쉽사리 제거하기 어려워서 정확한 석탄분자 구조나 그 액화반응 메카니즘을 규명하는데 여러가지 어려움이 따르게 된다. 예를들면 Zinc Chloride가 액화반응에서 효과적인 촉매인것에는 틀림없으나 그러한 촉매작용이 왜 수소기체 존재하에서 증가하는가에 대해서는 아직 정확한 설명을 할 수 없다.

액화된 석탄은 단일 성분이 아닌 수많은 물질의 혼합물이므로 이것을 여러가지 다른 방법에 의해서 가르고 갈라진 각 부분을 특성화할수 있다.

한가지 가능한 방법은 이러한 혼합물질을 용매에의 차이에 의해서 Oil, Resin, Asphaltene과 Benzene Insoluble 등으로 나눌수 있다. 많은 학자들은 Coal→Oil의 변화가 Coal→Preasphaltene→Asphaltene→Oil의 몇가지 과정을 거쳐서 일어난다고 주장하고 있으나 Preasphaltene과 Asphaltene이 실제로 Oil로 변화하는과정중에 중간체인지 아니면 Depolymerize한 작은 분자들이 다시 중합반응을 거쳐서 재형성된 집합체인지에 관해서는 아직까지 논란의 여지가 있다.

지금까지 논한 석탄의 액화반응은 고온 고압의 격렬한 반응조건하에서 이루어졌기 때문에 이러한 반응의 생성물로부터 원래의 석탄분자의 골격을 유추하는 것은 불가능하다. 이러한 목적을 위해서는 보다 더 격렬한 반응을 통해서 Condensed Aromatic Ring사이를 연결짓는 Methylene, Ether Bridge만을 화학적인 방법에 의해서 자른 다음 거기서 생성된 물질들의 구조

를 종합하여 원래의 석탄분자의 구조를 유추하는 것이 가능하다.

이와같이 석탄분자를 잘게 찌르는 방법에는 석탄의 Depolymerization, Friedel-Crafts Alkylation 과 Acylation 및 Reductive Alkylation 등이 있다.

이중에서 특히 Depolymerization이 잘 알려진 반응인데 이것은 Phenol용매와 Friedel-Crafts 축매의 존재하에서만 일어나는 것으로 알려졌다. 이러한 반응생성물질의 구조로부터 석탄분자내에 Methylene, Ethylene과 Acyl Bridge 등이 존재한다고 알려졌다. 그러나 비교적 최근인 1976년 ¹⁴C-Labeling에 의한 Ingnite 의 Depolymerization 연구에서는, 이러한 반응조건하에서는 다음과 같은 반응이 일어난다는 것이 알려졌다.

$Ar_3CH + H^+ \rightarrow Ar_2CH^+ + ArH$, $Ar_2CH^+ + Ar_3CH \rightarrow Ar_2CH_2 + Ar_3C$ 즉 석탄의 Depolymerization에 의해서 Diaryl Compound를 얻었다는 것이 반드시 그러한 구조가 원래의 석탄 구조에 존재한다는 증거가 될 수 없다는 것이 반응식은 말해주고 있다. 이밖에도 Alkylation 나 Acylation반응을 거친 석탄은 벤젠이나 피리딘등에 녹는 부분이 증가하는 것으로 보아 반응과정에서 석탄골격의 일부가 파괴되어 보다 분자량이 작은 물질들이 생성된다고 믿어진다.

석탄분자구조를 규명하기 위해서 고안된 이러한 덜 격렬한 반응에 의한 석탄의 Degradation

반응들은 아직까지는 그 분자구조에 대한 결정적인 어떠한 정보도 제공치 못하고 있다 하겠다.

석탄의 2차적인 가공기술은 앞서 언급한 바와같이 가스화와 액화로 크게 나눌수 있으며 1970년 중반부터 현재까지의 미국에서의 석탄액화는 주로 재분과 유황분이 적은 보일러용 연료를 얻는데 그 목적이 있었으나 앞으로는 Motor Fuel 및 여러가지 석유화학원료를 만들수 있는 방법에 대한 연구도 시작되고 있다. 그리하여 1990년대까지는 30여개 정도의 대규모 Synth. Fuel Plant 를 세워서 에너지의 상당부분을 석탄의 액화 및 가스화에 의하여 대체할 계획이며 이웃 일본에서도 미국 및 서독과의 제휴하에 SRC-II나 EDS Process에 의한 석탄액화 공장을 세울것으로 알려졌다.

이와같은 에너지 다변화정책의 일환으로 석탄으로부터 연료 및 화학연료를 얻는것이 정확히 어느시기부터 경제적인 타산이 맞을것 이라는 것은 어려운일이나 구미선진 제국들이 향후 10년을 목표로 연구활동을 하는하는 것으로 미루어 1990년대 이후부터는 이러한 방법들이 널리 이용되리라는 것을 기대할 수 있다.

이러한 세계적인 추세를 미루어 보거나 석유의 전량을 외국에 의존하고 있는 우리나라의 현실정를 감안한다면 앞으로의 에너지 및 원료원을 보다 매장량이 풍부하고 구하기 쉬운 석탄으로의 전환작업이 절대 필요하다고 본다.

□ “과학과 기술” 지 投稿案内 □

=論 壇= 가. 學術論壇: 産業發展에 寄與할 수 있는 國內외의 最新 科學技術
나. 學術情報: 새로운 海外의 科學技術 情報 紹介

=固 定 欄= 가. 科學隨感: 生活周邊에서 일어나는 여러가지 事例中 科學技術의인 내용을 소재로 한것
나. 漫畵: 科學技術界의 주변에서 일어나는 일을 소재로 한것

=原稿枚數= 가. 論壇, 기타 原稿: 24枚内外 (200字 원고지)
나. 科學隨感: 8 枚内外 (200字 원고지)
다. 寫眞: 1 枚 (명함판)

=其 他= 外來語表記는 文敎部에서 指定한 표기법을 사용하고 도량형은 政府가 指定한 도량형법인 미터法으로 표기해야 함. (採択된 원고에는 所定의 原稿料를 드립니다.)