



Fusion Space Station

OHKAWA Tihiro

*Archimedes Technology Group, 5660 Eastgate Drive, San Diego CA 92121, USA
Department of Physics, University of California at San Diego, La Jolla, CA 92093-0319, USA*

One wonders what fusion strategy we would have taken 40 years ago if we knew what we know now. The importance of the stable plasma confinement was recognized from the beginning, first for configurational stability and then suppression of turbulent transport. Many ideas and experiments were tested in 60's and 70's. The attempts were successful and the stable quiescent plasma was produced in the internal ring devices. In parallel the idea that we may be able to live with turbulent plasma was pursued. It is motivated by the view that the configurations must be "reactor relevant". The internal ring systems were judged as not relevant. Since the turbulent transport rate determines the size of a reactor, the efforts were concentrated in reduction of the transport rate. The beating of Bohm rate by T-3 tokamak swung the tide.

What was recognized but not really appreciated is the fact that the classical transport is predictable but the turbulence transport is not. Consequently the efforts were concentrated in obtaining empirical scaling laws by building many tokamaks in the world. It turned out to be a formidable task. In contrast to the fluid dynamics where Reynold number enables one to predict the performance of the real thing from the model tests; we are still far from acceptably accurate performance prediction. As a result the design of the next step is forced to be conservative and the device is large and costly.

The classical transport rate is not only small but its scaling is advantageous for the reactor development. For a given device, n [plasma density] \times τ [confinement time] is constant. The ignition condition is in terms of $n \tau$ but the power out put is proportional to n^2 . In other words the ignition can be achieved at very low power. The ignition demonstration can be done in a physics machine. The fusion power may be increased by raising plasma density after the ignition at low power is achieved. The power handling and the nuclear engineering equipments are added as needed. A ignition machine based on the turbulent scaling requires full engineering for high power to start with.

What if we took a different tact, namely attack "reactor relevance" rather than plasma confinement? There are several problems with the internal ring systems and the most acute one is the rejection of heat. The rings are surrounded by fusion plasma and receive several MW per square meter of heat in the forms of the particles such as neutrons and the

radiation. The situation is similar to a spacecraft where the waste heat must be radiated away into space. The skin of the rings must be above 2000⁰K to radiate more than MW/m².

The rings contain the superconductors at cryogenic temperature. The super-insulators must maintain the temperature gradient between the cryogenic temperature and the high temperature of the skin. There will be unavoidable heat leak and refrigerators with their power supplies are needed. Since the heat input is in the form of high energy neutrons the power generation is straight forward. It is like the power generation on earth. The heat balance of the earth is approximately between the solar radiation which is like blackbody radiation at 6000⁰K and the radiation from the earth at 300⁰K into space. All power generators on earth except nuclear power plants produce power by degrading heat at 6000⁰K to 300⁰K. For the rings the neutron energy is degraded to the skin temperature to produce power. An example is thermionic converters.

The cryogenic systems and superconductors must be shielded from the neutron flux. The thickness of the shield determines the minimum size of the minor radius of the rings. D-D reactions which require thinner shield or aneutronic reactions may be preferable for this reason.

The rings must be held in place against the magnetic force and the gravitational force. For the terrestrial installations the rings must be levitated magnetically against gravity. If it is installed in a space station only the tidal force must be compensated. The magnetic force situations are different for one ring [Spherator], two ring [Quadrupole] and so on. The one ring system requires the toroidal magnetic field. The linked magnetic coils make it unattractive. The rest does not require the toroidal magnetic field. The torus may be of a large aspect ratio like "bicycle tire" and access to the plasma is quite good. Quadrupole with two rings placed on the median plane is attractive in terms of magnetic force. The attractive force between parallel currents is taken up by the hoop stress of the rings and there is no force to move the rings.

It may need feed back coils to stabilizing against the tilt. The systems with three or more rings have the rings off the median plane. Those must be held against the force toward the median plane. Quadrupole has shallower magnetic well

compared to higher order multipoles. If the well is good enough, it has a definite advantage in mechanical aspect.

The hypothetical plan has two components, first build a low power ignition device in space and second develop the high power rings terrestrially. The ignition device uses two floating rings. Since the ignition power is miniscule and

cannot heat the ring significantly, they contain only the cryogenic super conductor coils. Because it is in space the project is international and the site is not in any country.

Suppose we initiated the plan 40 years ago. Where we would be now? My speculation is that the probability of having achieved ignition is pretty high. Reactors? May be.

(2004年9月8日受理)

新刊図書紹介

宮本健郎 著

「プラズマ物理・核融合」

(東京大学出版会, A 5 版, 380頁, 2004年, 定価 4,800 円)

渡利徹夫 (核融合科学研究所)

著者宮本健郎氏はプラズマ・核融合研究分野の先駆的研究者であり、現在も第一線の研究活動を続けています。同氏の著書「核融合のためのプラズマ物理」はプラズマ核融合研究に必要とされる物理を紹介した教科書で英語訳されており国際的に知られています。我々もこれを座右の書として成長し、学生教育に際しては教科書として使用してきました。この古典的な名著は現在にも通用する先見性をもっていますが、一方、核融合研究も進化してきました。核融合学として誇れる学術的内容を獲得したと言ってもよいでしょう。今回紹介する「プラズマ物理・核融合」は近年成立した物理的主要概念を取り入れて全面的な改訂をおこなったものです。以下に紹介する内容は難解そうに見えますが、整理された構成と平易な表現で読者を理解に導いてくれます。また、著者は序において「直登しなければ山には登れない」ことを示唆しています。

第1部は、プラズマ物理の基礎にあてられており、1) プラズマ素過程の解説、2) プラズマを記述する電磁流体方程式、3) 電磁流体方程式に基づく不安定性、4) 抵抗性方程式が記述されている。また、5) プラズマ中の波動伝播を記述するための分散式的手法、6) 熱運動を考慮した誘電率の導出など整理された形で記述されている。

電磁流体不安定性の記述に関してバルーニング不安定性の記述が大幅に増強され、読者は、磁気井戸、磁気シア、第2安定化領域などの基本的な概念を理解できるよう編集されている。また、エネルギー輸送に関連する乱流異常拡散についても物理的な洞察が加えられ、ボーム型およびジャイロボーム型拡散を磁気シアおよびモード結合と関連づけて説明している。過去20年における成果として、1) 実験において観測される巨視的不安定性の機構の同定が進んだことおよび、2) 高エネルギー粒子の及ぼす影響の理解が進んだことがあげられる。著者は、第13章において、高エネルギー粒子により引き起こされるフィッシュボーン不安定性の理論的説明を与えている。第14章では、最近話題となっているトロイダル誘起アルフベン固有モードの伝播および励起の機構について詳しい説明を与えている。第15章

は、計算機シミュレーションに関して概説している。計算機の発展が同分野に及ぼした影響は非常に大きい。MHD方程式にはじまり、ジャイロ流体方程式、ジャイロ運動論的方程式など記述する物理現象に沿う方程式系の簡略化の手法はそれ自身が物理的理解の進化を表しており、実験家を志すものも看過できない部分である。読者は、第13~第15章の現在の話題を通じて第1~第12章に書かれた物理的基礎を再確認することができる。

第2部では、核融合研究の歴史的発展として環状系、開放端系、慣性閉じ込め等、を含んだ核融合研究の流れが概説されている。トカマク(第16章)に関しては、平衡、密度限界、非円形断面効果、ダイバーター物理、閉じ込め比例則、閉じ込めに及ぼす電場の効果、電流駆動機構の理解など実践上不可欠な用語・概念の説明がなされている。また、1) 新古典ティアリングモードなどの物理的説明、2) 電場シアによる乱流抑制のメカニズムなど最近の重要な話題に関してもわかりやすい導入がなされている。

逆転ピンチ(第17章)に関しては Taylor の緩和理論、ヘリシティー保存などの基礎的概念が説明されている。ヘリカル系閉じ込め装置(第17章)に関しては、真空磁場に基づく閉じ込め磁場構造と予測される新古典輸送が簡明に説明されている。また、現在得られている LHD など現存装置の閉じ込めに関する結果と建設中の大型装置 W7-X などが紹介されている。第18章は、慣性核融合に関する解説がなされており、爆縮にともなう交換型不安定性、強いレーザー光に伴うポンデローモーティブ力、などの基礎過程の説明と近年提案されている高速点火などの概念も紹介されている。

核融合研究は飛躍的進化のあとに次世代研究を模索する時期にあります。大学院生・若手研究者が一冊の教科書を手にして歩み始めるとすればこの本をお勧めします。巻末の参考文献は著者が注いできた視線の軌跡を示すものですから、若手研究者への贈り物となるでしょう。

(2004年11月17日受理)