

# CEEF の物質循環系の設計にシミュレーションの果たした役割

## Role of Simulation in Design of CEEF Material Circulation Systems

○宮嶋宏行（東京女学館大）、石川芳男（日大）

Hiroyuki Miyajima\*, Yoshio Ishikawa\*\*

\* Tokyo Jogakkan College, 1105 Tsuruma, Machida-shi, Tokyo 194-0004, Japan

\*\* Nihon University, 7-24-1 Narashinodai, Funabashi-shi, Chiba 274-8501, Japan

\* E-mail: miyajima@m.tjk.ac.jp

### ABSTRACT

We reviewed the design process of the Closed Ecology Experiment Facility (CEEF) material circulation system by using simulation, so we reviewed the role which simulation contributed to the design. Based on the knowledge which we obtained, we will try to formulate a new design process for the future Advanced Life Support System (ALSS) design.

Key Word : ALSS, CELSS, ECLSS, State Analysis, System Model, Transient Analysis

### 1. はじめに

閉鎖型生態系実験施設(CEEF)は、核燃料再処理施設から気体として放出される放射性炭素(C-14)の循環と蓄積を調査するために建設された。この CEEF は、月や火星で使われる先端生命維持システム(ALSS)の設計データを得るためのテストベッドとしても利用可能である<sup>1)</sup>。このような ALSS のテストベッド施設の建設は世界でもあまり例がなく、ロシアや米国に数例あるのみである。有人宇宙活動の長い歴史を持つ米国でさえ新しい生命維持システムの設計は、20~30 年に一度というのが実情である。つまり同じ設計者が二世代の生命維持システムを設計することは非常にまれなことであり、このような施設の設計ノウハウや運用ノウハウを何らかの形で蓄積しておくことは非常に重要なことである。

本論文では、生命維持システムを環境制御生命維持システム(ECLSS)と閉鎖生態系生命維持システム(CELSS)の2つに区別して議論する。ただし CELSS という用語は、現在では、必ずしも閉鎖性を求めない ALSS に置き換わっている。ECLSS は主に居住環境の維持を目的としたシステムで、必ずしも物質を再生利用することを意味しない。一方、CELSS は物質を再生利用する閉鎖システムを意味する。

ECLSS の設計という点では、過去 50 年間の有人宇宙活動の蓄積があり、その設計法は文献<sup>2)</sup>などにまとめられている。しかしながら CEEF のような CELSS の設計になるとその設計法が十分にまとまっているとは言いがたく、CEEF の設計や運用そのものが、CELSS の設計を考える上で重要な意味を持つと考えられる。そこで本論文では、CEEF に関する文献や我々が過去に発表した論文を基に、CEEF の物質循環系の設計にシミュレーションの果たした役割についてまとめる。

### 2. 生命維持システムのシミュレーション

生命維持システムのシミュレーションによる研究には、ト

レードオフスタディ、システムモデルによる定常解析および過渡解析がある。代表的なトレードオフスタディの例にはフリーダム(現国際宇宙ステーション)を検討した ECLSS's Assessment Program (ESAP)や Space Exploration Initiative (SEI) を検討した Life Support System Analysis Model (LISSA)がある<sup>2)</sup>。またシステムモデルによる解析の例にはフリーダムを検討した Computer-Aided System Engineering and Analysis (CASE/A)がある<sup>2)</sup>。CASE/A は気体のマスバランスの解析や熱解析の機能を有し、ECLSS の解析が可能である。

一方、再生型の CELSS のシステムモデルによる解析を行う方法に Averner による元素単位で解析する方法<sup>3)</sup>、Volk らによる化学式単位で解析する生化学量論<sup>4,5)</sup>がある。この後者の方法が光合成や有機廃棄物の再生を含む CELSS の解析を可能にした。生化学量論の登場以降、多くの研究者が地上実験施設や将来の有人ミッションのための生命維持システムの解析にこの方法を利用している。次節以降では、CEEF のシステムモデルによる解析について述べる。

### 3. CEEF の物質循環系の設計とシミュレーション

システムモデルによる解析には、定常解析と過渡解析の2つのステップがある。CEEF の物質循環系の定常解析は文献<sup>6)</sup>に詳しく示されている。この設計過程の物質収支の計算では生化学量論が用いられ、マージン 2 割でサブシステムが設計された<sup>7)</sup>。この設計過程では、植物の栽培データ、非可食部の成分データの不足が指摘され<sup>7,8)</sup>、その後の実験でこれらのデータが取得された。これらのデータの取得により生化学量論を基にした定常解析モデルの精度が向上した。

システムモデルを用いた CEEF の物質循環系の過渡解析は、定常解析の結果を基に行われる。CEEF などの地上実験施設の建設以前は、トレードオフスタディやシステム検討がシミュレーションによる研究の中心であったが、それ以降は、シ

システムモデルを用いた地上実験施設の運用の検討が新たな研究の1つとして加わった。例えば、CEEFの過渡解析には、設計条件<sup>6,7,8)</sup>をもとに所要の性能が発揮できるかどうかを検討した例<sup>9,10)</sup>、安定した閉鎖運用を始めるために必要な各タンクの初期物質質量、安定した閉鎖運用を始めるための条件、および閉鎖運用が可能となる時期をそれぞれ解析した例<sup>9,10)</sup>、開放系で運用されているCEEFの情報を基に、実際の実験では結合されていない装置を結合した閉鎖系での運用について解析を行った例<sup>11)</sup>がある。

このように実験条件が確立しておらず、様々な実験条件が考えられるシステムの検討には、シミュレーションによる解析が大きな役割を果たす。特にCEEFのように1つ1つの実験に数ヶ月から数年という長い時間を必要とする場合、シミュレーションそのものが計算機上での実験の1つとなり、実験条件の確立や実験を行っていない条件での実験の予測に役立つ<sup>12)</sup>。そのためには、すでに行われた実験によって得られたデータにより予測精度を高めること、シミュレーション条件と実際のシステムの違いをきちんと押さえることが必要である。先に示した研究は、そのような目的の下に行われCEEFの改修や運用について数々の提案を行った。

#### 4. 生命維持システムの設計

生命維持システムの設計は、Fig. 1に示すように人間、生命維持システム、ミッションの3つの同心円で表現される<sup>13)</sup>。生命維持システムはミッション要求の中で人間の要求を確実に安全に満たすように設計される。それぞれの境界での検討は、設計者によって行われ、この過程は設計者の経験によるところが大きい<sup>13)</sup>。そしてシミュレーションは、この経験の部分を実験者の頭に中で顕在化させる効果がある。これは複雑なシステムを設計するためには非常に重要である。

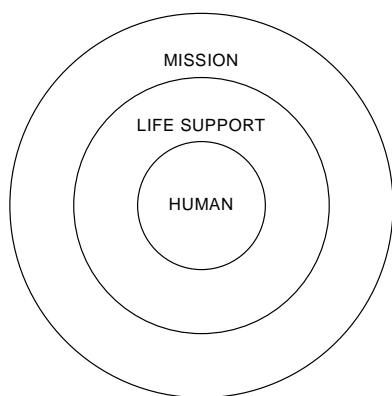


Fig. 1 生命維持システムの設計

#### 5. まとめ

CEEFの物質循環系の設計にシミュレーションの果たした役割をまとめると以下ようになる。

1. 設計データを基にしたシステム性能の確認により改修や運用についての提案を行った。

2. 実験データを基にしたシステム性能の確認により改修や運用についての提案を行った。
3. 段階的なインテグレーション実験の模擬を行うことで事前に実験条件を検討することを可能にした。
4. 時間がかかる実験に対して実際の実験を行わない条件で検討することを可能にした。
5. シミュレーションは、複雑なシステムのプロトタイプ設計で設計者が行う試行錯誤を助ける働きがある。

CEEFの物質循環系のシミュレーションにより得られた知見は、将来のALSSの設計に貢献すると考えられる。また貢献が可能となるように設計過程の定型化を今後行いたい。

#### 参考文献

1. 新田慶治, 居住実験の意義, 2005 生態工学会年次大会発表論文集, pp. 69-70, 2005.
2. P. O. Wieland, Designing for Human Presence in Space, : An Introduction to Environmental Control and Life Support Systems, NASA RP-1324, 1994.
3. M. Averner, An approach to the mathematical modeling of a controlled ecological life support system, NASA CR-166331, 1981.
4. T. Volk and J. D. Rummel, Mass Balances for a Biological Life Support System Simulation Model, Adv. Space Res. Vol.7, No.4, pp. (4)141-(4)148, 1987.
5. J. D. Rummel and T. Volk, A Modular Bliss Simulation Model, Adv. Space Res. Vol.7, No.4, pp. (4)59-(4)67, 1987.
6. K. Nitta, Material Flow Estimation in CELSS, Acta Astronautica Vol. 27. pp. 205-210, 1992.
7. 新田慶治, 芦田章, 閉鎖生態系実験施設(CEEF)の建設, CELSS 学会 1995 年度年次学術講演会講演集, pp. 97-99, 1995.
8. 芦田章, 多胡靖宏, 新田慶治, 可食部・非可食部有機物元素分析による閉鎖系物質循環設計, CELSS 学会 1995 年度年次学術講演会講演集, pp. 117-119, 1995.
9. H. Miyajima, Y. Ishikawa, A. Ashida and K. Nitta, Development of Simulation Model and its Application to an Integration Test Project of CEEF, SAE 2000-01-2334, 2000.
10. H. Miyajima, K. Abe, Y. Ishikawa, A. Ashida and K. Nitta, Simulation to Support an Integration Test Project of CEEF, SAE 2001-01-2130, 2001.
11. H. Miyajima, Y. Ishikawa, R. Arai, Y. Tako, K. Nitta, Considerations of Material Circulation in CEEF Based on the Recent Operation Strategy, SAE Technical Paper Series 2003-01-2453, 2003.
12. 細見達男, 多胡靖宏, 芦田章, 新田慶治, 時森美孝, 山本富喜, 物質循環シミュレーションソフトウェアの開発, CELSS 学会 1995 年度年次学術講演会講演集, pp. 73-82, 1995.
13. H. Jones, Design Rules for Space Life Support Systems, SAE 2003-01-2356, 2003.