

生物プロセスシステム工学による FUKUSHIMA の創成

室岡 義勝

バイオ専門家はなすすべもなく

生物工学の強みは、生物の生態を知り、その巧妙な生物の機能を工学として上流から下流までのプロセスをシステムとして捉えることだろう。最近の科学技術は、狭い専門分野に固守してそれでいて何でもできるような錯覚に陥っている。たとえば、メダカの発生機構を研究している科学者が、バイオテクノロジー関連プロジェクトに専門家顔して参加し、プロジェクトから外れた研究でもって研究費を浪費しているのがそれである。

先の福島第一原子力発電所事故（原発事故）による科学者や東京電力、政府関連機関の対応を見ていると、どうも場当たりの、施策に一貫性が見られない。放射性物質含有廃棄物の焼却方法や焼却場を考えないで、汚染された雑草や落ち葉などの焼却物を集めて山積みしたり、放射性排水処理場を設計しないで放射性汚染水を大量に溜め込んだり、放射性汚染土壌の置き場を考えないで汚染土壌を削り取ったりなどなど。こうしたことは、プロセス工学やシステム工学などを少しかじった工学・農学技術者にとってはなんとも不思議に思えてならない。事故当時我々バイオ関係者は皆、真剣に何とかしたいという思いはあったが、残念ながら当時の事故処理政策決定にお呼びでなかった。もっともお呼びであったとしても、日本のバイオテクノロジーは生命医学系研究者に牛耳られているので、工学・農学系生物工学者の出る幕はなかったであろう。

環境省の研究者も専門が分化されていて、一部の人を除いて放射性物質の研究経験がなく、最初はとまどうばかりだったと推測される。その内、各種専門委員会を立ち上げて、多くの告示、条例を発した。しかし、いまだに放射性廃棄物処理は、土木が主流である。かく言う生物工学者としても、きわめつけのアイデアがあるわけではなく、うろたえるばかりであるが、それでも汚染の上流から汚染処理の下流まで眺め渡して最良の方法を考えつくかもしれない。

市井ボランティアの盲点

私は、市井のボランティアをここで批判するつもりはまったくなく、逆にその行動力を尊敬している一人である。私自身は、バイオレメディエーションの研究をしていたこともあって、原発事故直後から、放射性物質に汚染された農地浄化の技術援助をしたいと思っていた。予期したように原発事故による福島県産農産物の風評被害が始まり、市民団体もなんとか放射性汚染農地の浄化をしたいとボランティアをかって出ている。その結果プログラムの多くに、「ナタネやヒマワリは汚染セシウムの50%以上を数か月で吸収するから放射性汚染土壌の浄化に有効である」と、出処のわからない情報の受け売りが横行した。そこで、多くの原著論文に当たったところ、情報源の原著論文が水耕栽培による実験であったことがわかった¹⁾。植物栽培用培地に放射性セシウムを入れてヒマワリを育てた結果、ヒマワリは水中の¹³⁷Csを24-27%、⁹⁰Srを22%吸収するというものであった。ヒマワリでなくてもナタネなど多くの植物が水耕栽培ではセシウムやストロンチウムなどを効率よく吸収するのは当然であろう。もっとも原著者らの実験目的は、 K^+ や Ca^{2+} などが放射性 Cs^+ や Sr^{2+} の吸収を阻害することを示す実験であった。

チェルノブイル近郊でも活動してきたというNPOは、ナタネやヒマワリを福島の放射性汚染田畑に植えた。2011年夏にはそのヒマワリ畑が、新聞（朝日、7月10日、2011）やTVで紹介された。いつしかその報道が途絶えたのは、土壌の浄化効果がほとんどなかったことに加え、放射性物質を吸収したヒマワリなどのバイオマスの処置に困ったことが原因であった。

レンゲソウによるカドミウムやセシウム汚染土壌の浄化実験

私たちは以前、稲田の肥沃化に古くから栽培されてきたレンゲソウによるカドミウムで汚染された稲田土壌のバイオレメディエーションを研究してきた²⁾。レンゲソウ根粒菌 *Mesorhizobium huakuii* subsp. *rengai* を接種することにより、稲田の土壌中のカドミウムは最大で9%

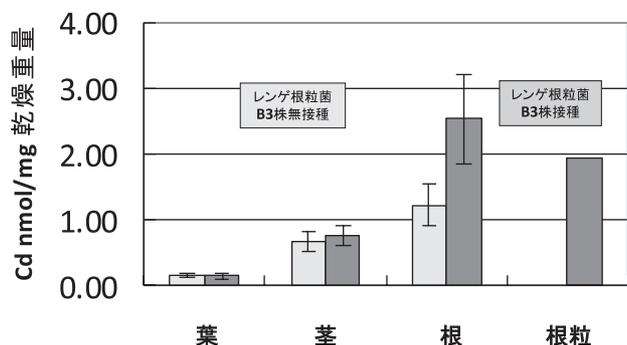


図1. レンゲソウによるカドミウム汚染稲田土壌からのカドミウムの吸収とレンゲソウ根粒菌の接種効果³⁾. □, 根粒菌非接種; ■, 根粒菌接種.

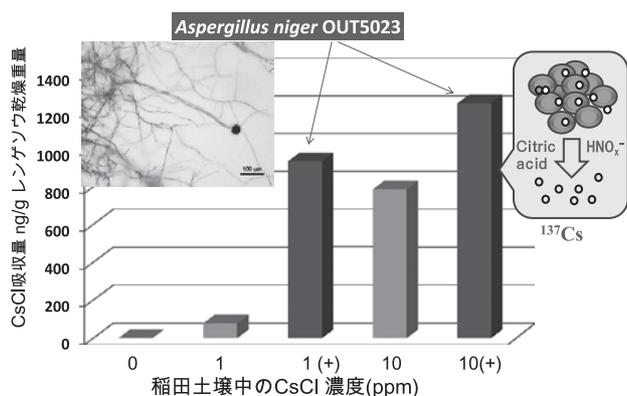


図2. クエン酸生産菌, *Aspergillus niger* 接種による, レンゲソウへのCs⁺吸収効果. (+), *A. niger* 菌接種.

近くもレンゲソウにより吸収された³⁾ (図1). そこで, 原発事故による放射性セシウムなどに汚染された田畑の土壌浄化にもレンゲソウが有効ではないかと考えた.

原発事故当時, 放射性汚染土壌サンプルの移動や放射性物質の分析などの条件が整わず, とりあえず非放射性セシウムを用いて, 稲田の土壌にセシウムを添加してポット栽培実験を実施した. レンゲソウは, 土壌中セシウム濃度10 ppmまでを直線的に取り込んだ. セシウムは, 土壌中の粘土などに強固に結合する⁴⁾. 土壌からのセシウムの遊離には, アンモニアや塩酸などの酸が有効とされていた. そこで, 酸を土壌に添加する代わりに, クエン酸生産菌である *Aspergillus niger* OUT5023 の接種を試みた. すると非接種土壌よりもCsCl 1 ppmでは40倍ものセシウムの吸収が見られた(図2). これは糸状菌の作るクエン酸によりセシウムが遊離して, 植物に吸収されたことを示していた. その結果, 土壌中のCsClの約1%がレンゲソウによって吸収除去された.



図3. 福島県農業総合センター内放射性物質汚染圃場内でのレンゲソウの栽培実験.

福島の¹³⁷Cs汚染畑でのレンゲソウ栽培

2012年10月, 福島県農業総合センターおよびカゴメ(株)の協力を得て, 福島県と同センター内の¹³⁷Cs汚染農地(約17万 Bq/m²土壌)においてレンゲソウの試験栽培を開始した(図3). 4月初めに, 樋口松之助商店よりクエン酸生産菌として分譲された *A. awamori* の種麹菌を米粉にまぶして, レンゲソウ周辺土壌に接種し, 5月末に土壌中および植物体の¹³⁷Cs濃度を測定した. その結果, レンゲソウによる吸収除去率は0.0033~0.0095%であり, 栽培前と後で土壌中の¹³⁷Cs濃度に有意差が見られなかった. 土壌の構成成分によりセシウムの結合にかなり違いはあるが⁴⁾, 放射性物質汚染後すでに2年が経過しており, セシウムは土壌表面に強固に結合していると考えられた. こうして実験室と現場との違いを思い知らされた. 実験室のポット栽培ではセシウムと根粒菌および *A. niger* を土壌に均一に分散させ, 水散布しながら汚染と除染(遊離と吸収)を同時進行で行った. 一方, 汚染現場ではセシウムの大部分が土壌表層に強固に吸着され, その先に深く伸びたレンゲソウの根からの吸収がほとんどなかったものと思える.

放射性物質のファイトレメディエーション

チェルノブイルの原発事故(1986)から10年以上経て, 原発から10 km地点の放射性物質汚染土壌において植物による浄化研究がなされた⁵⁾. Duchenkovらは種々の植物種を試験した結果, アマランサス(ハケイトウ)がもっともセシウム吸収が高いことを発見した(図4). しかし, バイオマス量がかさみその後の処理が問題であるとしている. この図で見る限り, アブラナ科やヒマワリなどに

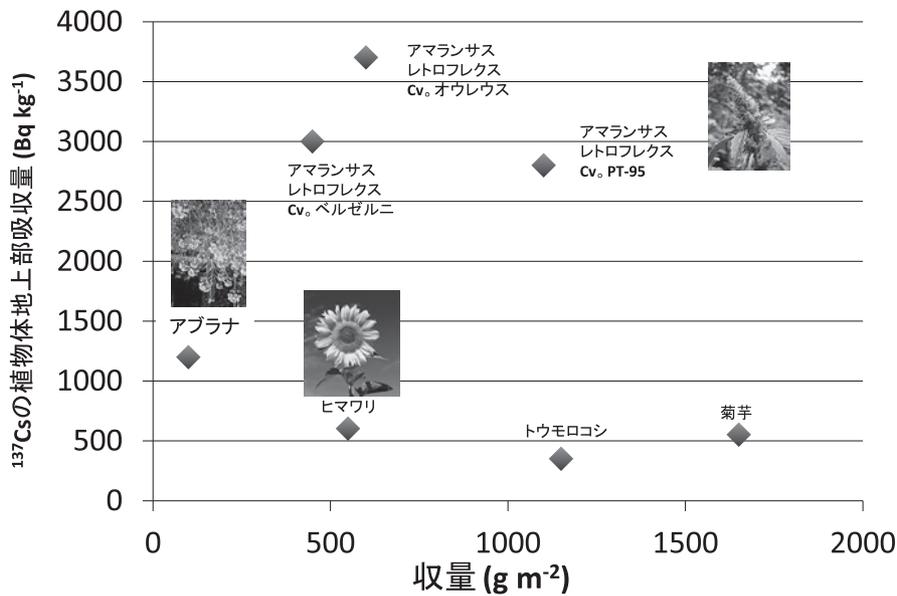


図4. チェルノブイル近郊の汚染土壌での種々な植物種による放射性¹³⁷Csの吸収試験⁵⁾.

よる¹³⁷Cs吸収量は高くない。

福島県農業総合センターでも、ヒマワリ、ソルガム、アマランサス、ソバなどの吸収除去効果を放射性物質汚染土壌で実験した⁶⁾。しかしながら、これら植物体による¹³⁷Csや⁹⁰Srの吸収除去率は0.003～0.08%であり、レンゲソウも同様であった。こうした実験結果から、ファイトレメディエーションは放射性汚染土壌に対しては実用的でない結論せざるを得ない。イネにおいても¹³⁷Cs吸収除去率は、0.001%以下であり、イネが吸収した¹³⁷Csや⁹⁰Srの白米への移行率は、¹³⁷Csで植物体全体の7%、⁹⁰Srで1%以下であった⁷⁾。ファイトレメディエーションが有効でないことは、ひるがえせば1万Bq/kg以下の低濃度放射線汚染土壌での穀物栽培は今やまったく問題ないと言えよう。

下流から上流を俯瞰する

バイオの研究は、最初に考えた通りにはいかないのが普通である。したがって、実験をしながら補正、改良していくしかない。プロセスシステム工学では、原料から製品製造、廃棄物処理までの収支計算をして、より効率の高いプロセスを考える。したがって、放射性汚染物質の除去にあたって、最終処理をどうするかを初めに考えるのは当前である。高濃度の放射性汚染水や廃棄物を保管貯蔵するのは致し方ないとして、大量に発生することが予想される低濃度放射性汚染水と廃棄物をどのようなシステムで処理するかを考えて、除去プロセスの計画を立てるのはこれまた当然である。この当然考えるべき核

燃料廃棄物の最終処理計画を後に延ばしてきたのが原的なのであるが、その議論はさて置こう。

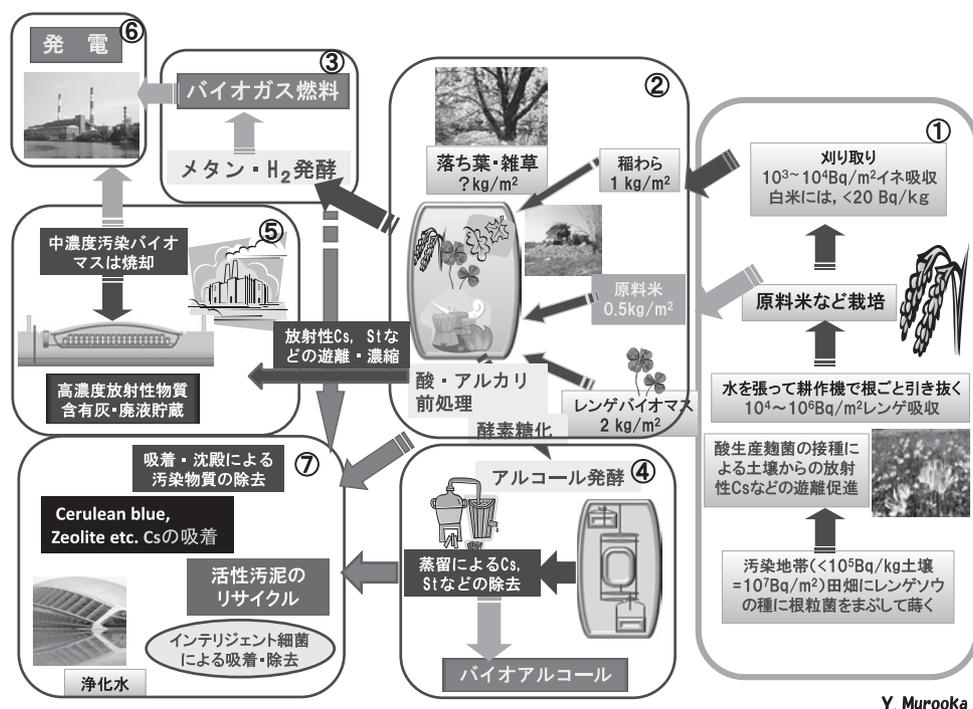
こうして、下流から上流を見たとき、広範囲に拡散した放射性物質の生物濃縮と汚染バイオマス量の減量という当たり前の結論に達する。こうして描いたフローシートが、図5である。

放射性汚染バイオマスの減量化法

このフローシートでは、上流から下流までを以下の7プロセスに分けてみた。

①低放射性汚染田畑における土壌浄化と原料米の生産、②放射性汚染落ち葉、雑草、原料米、稲わら、レンゲソウなどのバイオマスの減量化のための前処理および遊離放射性物質の濃縮除去、③前処理したバイオマスのメタン発酵などによるバイオガス生産、④前処理後のバイオマスのアルコール発酵によるバイオアルコール生産、⑤発酵過程で生じる残渣の燃焼および濃縮された高濃度放射性灰の保管管理、⑥燃焼およびバイオガスによる発電、⑦前処理、メタン発酵、アルコール発酵および各種浄化・洗浄過程で生じた放射性汚染水の処理。

プロセス①において、ファイトレメディエーションが期待できなくても、かつての耕作地を放棄しておくのは得策ではない。放棄することは、先祖代々営々と築き上げた美田を弥生時代の湿地帯や雑木林に戻すことを意味している。ここでは、将来いつでも稲田として復活できるように、毎年雑草を刈り取り、レンゲソウを植えて化学肥料無添加で肥沃土壌を保ち、水を張って土壌をかき



Y. Murooka

図5. 土壌からの放射性物質の生物濃縮とバイオマス量の削減及びその処理・浄化プロセスのフローシート.

混ぜ、採算を無視して原料（工業用）米を栽培する。その間、本特集で提案されている土壌浄化法の改良や実地試験も検討する。落ち葉、雑草、レンゲソウ、原料米、稲わらなどのバイオマスはすべて、減量化の前処理②に集めて、酸処理やより有効な方法により遊離した放射性物質の濃縮除去後、バイオガス③やバイオアルコール④などへのエネルギー転換を図る。

プロセス②～⑦については、本特集の他の解説を参照していただくことにして、私の意図を簡単に説明するに止めよう。まずプロセス②で収集したバイオマスは、燃焼させるのが一番手っ取り早い。しかし、燃焼には補助燃料も必要であるし、何よりも燃焼による膨大な低濃度放射性廃ガス、汚染灰が生じる。放射性排ガス集塵装置も設置しなければならない⁸⁾。その集塵フィルターも集塵装置もそのうち放射性ゴミとなる。焼却副産物の低灰、飛灰、熔融スラグ、スクラバー排水などは放射性のためコンクリートにして利用できないので膨大な量の放射性廃棄物となる。ならば、低放射性バイオマスを焼却しないで乾燥させて埋めるとなると、これまた毎年膨大な量となる⁹⁾。事実、現在福島県以外でも山積み放置されている。

生物工学会からの提案と環境省の取組み

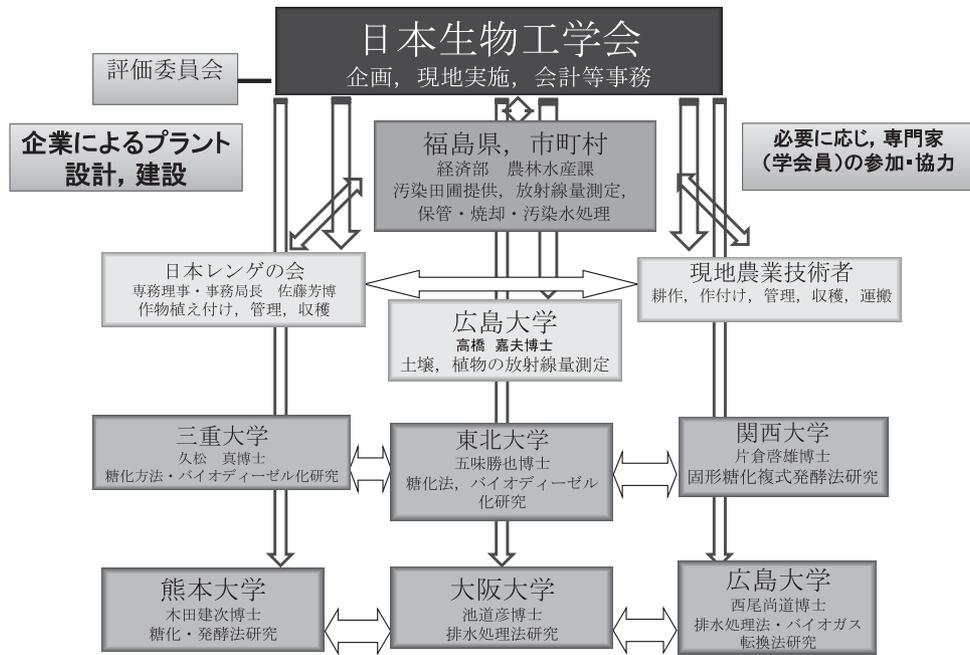
私たちも決して手を拱いていたわけではない。生物工

学会員の英知を結集すれば、汚染処理対策の企画や技術支援ができると考え、図5の基となる提案書を作成し、図6のような大学などの連携をお願いして、民間団体の資金公募に応募したり、農林水産省の担当部署に説明に出向いたりした。結果的にはこの提案は採択されなかったが、後の資料として添付しておく。一方で丸菱バイオエンジの山縣会長の支援により福島県の西郷村と生物工学会との共催による放射能汚染浄化に関する公開シンポジウムを開催した。

原発事故後、環境省も福島県も汚染状況調査や放射線量測定法、浄化法の指針などを公布している。環境省からの特定廃棄物の処理フローの概略を図7に示す。ここでは、土壌の剥ぎ取り、手っ取り早い焼却と最終処分場への保管が主であるが、その設置場所は今も難航している。原発の高濃度放射性排液はもとよりプロセス⑦の低濃度放射性排水処理法の確立が喫緊の問題であり、生物工学者の出番である。

負の遺産を超えてFUKUSHIMAの創成

私の描く福島の創成は、まず原発2～5 km圏内を政府が半永久的に借入れて、被災者に借地料を払う。地方自治体にこの土地を無償提供し、当初は放射性廃棄物の処理をしながら、改良と経験を加えてバイオマスを有効利用するリファイナリー・バイオコンビナートを構築す



アドバイザー:原島俊(生物工学会会長), 大山卓爾(新潟大農学部部長), 横山正(東京農工大教授), 藤巻秀(原子力開発機構)

図6. 放射性汚染浄化技術の開発実施体制 (2011年6月)



図7. 特定廃棄物及び除染に伴う廃棄物の処理フロー (福島県内). 環境省ホームページより引用.

る構想である (図8).

その財源としては、各省庁がこじつけて流用している復興財源をまさに復興のために使用する。雇用も地区の再生もできる。この図を本会誌の読者に説明する必要はないだろう。必要エネルギーは、すべて再生自然エネルギーからまかなうとしても、バイオマスからのリファイナリーは、一部の化学工学者が主張するようにエネルギーバランスにおいても経済性においても成り立たないであ

ろう¹⁰⁾。たとえ微量であっても放射性物質がコンタミしているバイオ燃料は消費者に受け入れられないので発電に使用する。特にバイオマスの変換により生じる残渣などは、放射性であるため、飼料や堆肥などへの再利用ができない。当面は放射性廃棄物処理財源や復興財源に頼れるが、その内採算の取れるリファイナリー技術革新を生物工学者がやらなければならない。原発廃棄炉は、平成の古墳としてメモリアルパークを建設し、低放射能の



図8. リファイナリー・バイオコンビナート構想

アグロ・インダストリータウン構想
 四季折々、海から丘につながる菜の花、レンゲ、ヒマワリ、稲田の景観
 蜂蜜、食用油などの食品工業、日本酒・葡萄酒・醤油・みそ・食酢などの醸造工業
 バイオ:アルコール・ガス・ディーゼルなど燃料工業、自然エネルギー発電



図9. FUKUSHIMAのアグロ・インダストリータウン構想

人体への影響を研究するヘルス研究センターを設置する。
 「福島」は知らずも世界の「FUKUSHIMA」へと知名度を上げたのだから、私の構想はこの負の遺産を正の遺産へと活用しようというものである。それが、アグロ・インダストリータウン構想である(図9)。これも説明は

いらないだろう。四季折々、豊かな海から丘につながる菜の花、レンゲ、ヒマワリ、ぶどう畑、稲田の田園風景とメモリアルパークとで観光客を呼び込む。食用油、蜂蜜などの食品工業、日本酒、葡萄酒、ビール、醤油、味噌、食酢などの醸造工業、バイオコンビナートを中心と

したバイオ・アルコール・ディーゼル・ガスなどの燃料工業と太陽光・風力・小型水力発電などなどによる田園工業都市を建設する。

「そんな楽観論の夢みたいな話」と批判されるならば、より現実的で未来のある構想を提案して欲しい。特に微量放射能に対する以下の私見は、私の体験から許してもらえるだろうか。放射能の人体への影響は、1シーベルト以上の致死量に近い放射線を浴びた被災者と年間数十ミリシーベルト以下の低放射能とは区別する必要がある。生物は、DNA損傷や細胞分裂に対していくつものチェック・修復機能やアポトーシスを備えており、骨や心筋は別にしても、細胞は新陳代謝を繰り返しているから微量放射線を極度に怖がる必要はない。私は、広島原爆炸裂当時3歳で、30 km圏内で幼児期を過ごした。その5年後に爆心地から2 km圏内の広島市内に移り住み、小学生から大学生まで、残留放射能など知るよしもなく、太田川の水を飲み、地元の野菜や魚を食べ、爆心地付近の川で泳いで育った。原爆と原発事故は核種も量も違う¹¹⁾が、私よりもさらに幼児期から5 km圏内で育った多くの同級生のガン発生率も死亡率も全国平均より高くもなく、いまだに多くの同級生が健在である。

広島には日本酒、銘菓、牡蠣などのブランド食品もあれば、原爆記念公園を中心に平和都市として毎年世界か

ら200万人以上の観光客を迎えている。このように、福島も世界のFUKUSHIMAとして創成して欲しいというのが、私のHIROSHIMAからの願いである。

本企画研究にご協力いただいた、福島県農業総合センターの鈴木安和博士、斎藤隆博士、カゴメ(株)の安本光政博士、樋口松之助商店(株)の樋口松之助氏、丸菱バイオエンジの故・山縣民敏氏に御礼申し上げます。

文 献

- 1) Soudek, P. *et al.*: *J. Environ. Radioact.*, **88**, 236 (2006).
- 2) Ike, A. *et al.*: *J. Biosci. Bioeng.*, **105**, 642 (2008).
- 3) Murooka, Y. *et al.*: *Microorganisms in Industry and Environment* (Mendez-Vilas, A, ed.), 235, World Scientific, London (2011).
- 4) 山口紀子ら: *農環研報*, **31**, 75 (2012).
- 5) Duchonkov, S. *et al.*: *Environ. Sci. Technol.*, **33**, 469 (1999).
- 6) Suzuki, Y. *et al.*: *Proceedings, Int. Sym. Environ. Monitor. Dose Est. Fukushima PS, Kyoto Univ.*, Part 3-6 (2012).
- 7) Tsukada, H. *et al.*: *J. Environ. Radioact.*, **59**, 351 (2002).
- 8) 山本節子: *ゴミを燃やす社会*, 築地書館 (2004).
- 9) 西尾 漠: *どうする?放射能ゴミ*, 緑風出版 (2012).
- 10) 久保田宏, 松田 智: *幻想のバイオ燃料*, 日刊工業新聞社 (2009).
- 11) 中川保雄: *放射線被曝の歴史*, 赤石書店 (2011).