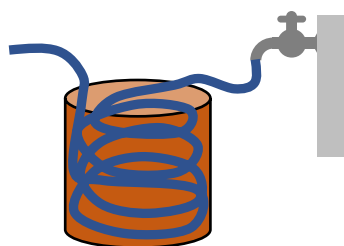


## 紫外線照射装置について

エザサ:

「紫外線照射装置というのは、流量によって性能が変化するんだよ。たとえば、蛇口にホースをつないで、水を出す。そのホースがぐるぐる巻きになっているところをバケツに入れる。そのバケツの中に熱湯を入れると、ホースから出てきた水は暖かくなっているよね。このとき、水をたくさん出せば水はぬるくなるし、少しだけしか出さないようにすればお湯になって出てくる。例えば長くなっちゃったけど、紫外線照射装置もこれと同じで、たくさん流せば菌は少ししか不活化されなくて、流量を少なくすれば不活化率が高くなるんだ。」



オツカ:

「バケツの中に熱湯の温度も、ホース出口の水温に影響するよね。」

エザサ:

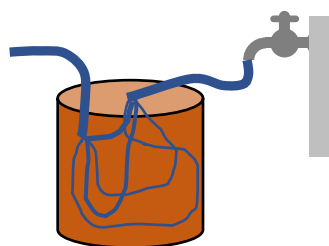
「その指摘、センスいいねえ。紫外線照射装置では、その熱湯の温度に相当するのが紫外線強度になる。ホース出口の水温に相当するのが紫外線照射量になる。」

オツカ:

「紫外線照射装置のイメージが、何となくわかったような気がしてきた。他には何かある？」

エザサ:

「実際の装置にもっと近づいた例えをするなら、蛇口から出た水は複数本のホースに分かれるんだ。ホースの長さや太さはバラバラで、その結果、各ホース出口の水温がマチマチになる。例えば 1°C刻みで各温度の水量を描いたものに相当するのが紫外線照射量分布となる。ただし、実験データは各ホース出口での水温と水量の値を教えてください。教えてくれるのはそれらのホースを 1 本にまとめた後の水温だけだ（水量は蛇口を出たときと同じ）。」



オツカ:

「他には？」

エザサ:

「今、蛇口から出るのは水と言っているけど、これがもし油だったらどうする？」

オツカ:

「油は危なくて、実験には使いたくないと思うよ。」

エザサ:

「だよ。だから実験には水を使って、油の場合を予想することになっているんだよ。これを紫外線の場合で表現するなら、病原性微生物（油）を使用しないで、安全で取扱いが容易な微生物（水）で実験して、病原性微生物をどの程度不活化できるか（水と油で

例えると、温度上昇)を予想する、ということになるんだ。」

オツカ:

「水で温度が 10°C上がったからと言って、油でも同じ流量で10°C上がるとか限らない。それでも油を使わずに水を使って装置の性能を評価するということなんだね。」

エザサ:

「そういうことだ。この水を使った実験を装置の性能評価試験ということにする。」

それではRED (Reduction Equivalent UV Dose または Reduction Equivalent Dose) について具体的に話していこう。最初の『REDについて』のところがREDの説明で、それ以降はREDの特性や関連する項目について触れている。」

オツカ:

「REDの特性とか関連する項目とかって？」

エザサ:

「『REDについて』の後に、

- ・ REDと平均した紫外線照射量
  - ・ 微生物の紫外線耐性に依存するRED
  - ・ REDと微生物の紫外線耐性との関係
  - ・ 病原性微生物 B 菌と安全かつ取扱い容易な微生物 A 菌
  - ・ REDと紫外線強度との関係
  - ・ RED bias
  - ・ CFD-I
  - ・ 安全率
  - ・ テスト
- という話の順だ。」

オツカ:

「おいおい、テストがあるのかよ。」

**RED**について

昔々、あるところで下痢が集団発生しました。調べてみると患者から共通してある特定の病原性微生物 *Baibai* 菌が検出されました。調査の結果、口に含んだ水に原因があること、塩素消毒では消毒が不十分であることがわかりました。

塩素に替わる消毒技術として、紫外線が注目されました。その微生物の紫外線耐性を調べた論文があり、99.9%不活化するためには紫外線照射量が 12 mJ/cm<sup>2</sup>必要であることが示されていました。

そこで、この微生物を含んだ水を紫外線照射装置に流して、処理後の不活化率で99.9%にできるかを実験で確かめたいと考えました。しかし、そんな危険な微生物をこの実験で扱うことは困難です。微生物の培養設備、培養液の実験場所までの運搬、実験に使用した水やその設備の消毒などに問題があるからです。

エザサ:

「99.9%不活化するために必要な紫外線照射量が 24 mJ/cm<sup>2</sup>の菌があって、危険性がなく取扱いが容易だから、この菌を使って実験しよう。名前は *Kyoushi* 菌という。」

オツカ:

「それで、問題になっている *Baibai* 菌の2倍の紫外線耐性がある *Kyoushi* 菌を99.9%不活化できたなら、文句なしだね。」

エザサ:

「その通り。でも、それはちょっと過剰照射と言われるかも…この話題は後ほど。紫外線照射装置が *Kyoushi* 菌を 99.9%不活化できたとき、その装置の性能を『*Kyoushi* 菌 REDが 24 mJ/cm<sup>2</sup>』と表現するんだよ。REDとは換算紫外線照射量。REF (Reduction Equivalent Fluence) ということもある。」

オツカ:

「なるほど、*Kyoushi* 菌で換算した紫外線照射量が 24 mJ/cm<sup>2</sup>ということだね。でも、なんでわざわざREDの前に『*Kyoushi* 菌』を付けるんだい？」

エザサ:

「いい質問だねえ。」

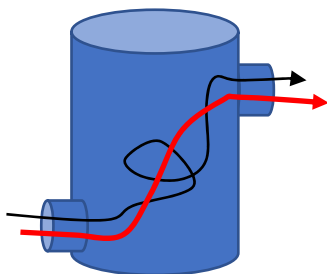
### REDと平均した紫外線照射量

エザサ:

「紫外線照射装置は水を流しながら紫外線を照射しているから、速く出てくる水もあれば遅く出てくる水もあるよね。」

オツカ:

「それはそうだ。」



エザサ:

「それから、紫外線を照射している光源に

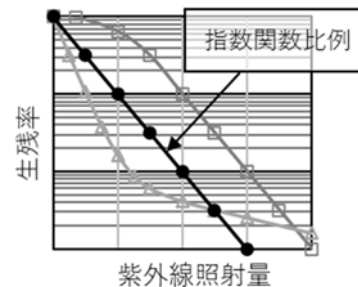
近いところは紫外線が強くて、光源から離れると弱くなることもわかるよね。」

オツカ:

「確かに。」

エザサ:

「微生物の紫外線による不活化が、紫外線照射量に対して指数関数比例 (生残率が指数関数的に減少) するか、それに似た挙動を示す。たとえば、1の紫外線照射量で生菌数が 1/10 になったとすると、2の照射量ではさらに 1/10 になり、3ではさらに 1/10 になるので元の 1/1000 になるという関係だ。」



オツカ:

「塩素消毒での D 値 (decimal reduction time) とよく似た話だね。」

エザサ:

「そのとおりだ。D 値を知っているなら、話が早い。D 値は生菌数を 1/10 に低下させるのに必要な時間だよ。紫外線の場合、その時間が紫外線照射量になったと考えてくれればいい。紫外線照射量というのは紫外線強度と照射時間の積で求められる値だから、時間の項が入っている。」

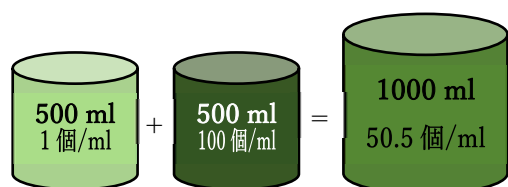
さて、ここで問題です。生菌数が 1 個/ml の水と 100 個/ml の水を同じ量で混ぜると、生菌数が何個/ml になるでしょう。」

オツカ：

「1個/mlと100個/mlの平均だから、50.5個/mlだね。なんとなく、10個/mlと言いたくなるけど。」

エザサ：

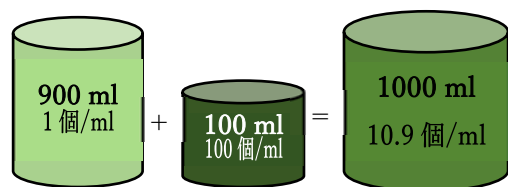
「正解です。それぞれの量を500mlとすると、1個/ml×500mlの500個と100個/ml×500mlの50,000個とを足した50,500個を、体積の1000mlで割ればいいんだから、50.5個/mlだね。」



では、生菌数が1個/mlの水900mlと100個/mlの水100mlを混ぜると、生菌数が何個/mlになるでしょう。」

オツカ：

「1個/ml×900mlの900個と100個/ml×100mlの10,000個とを足した10,900個を、体積の1000mlで割ればいいんだから、10.9個/mlだね。」



エザサ：

「はい、正解です。ここで、1個/mlとか100個/mlとか言ったけど、これが元々1,000個/mlの生菌数だったとしよう。それを紫外線でも塩素でもいいから1/1000、1/10に

不活化した結果が1個/mlとか100個/mlであった。ここまではいいかな。」

オツカ：

「いいよ。」

エザサ：

「さっきの指数関数比例の関係を適用すると、1/1000に不活化するための紫外線照射量(塩素消毒なら、一定塩素濃度での接触時間)は1/10にするための紫外線照射量の3倍となる。」

オツカ：

「ふむふむ。なんか核心に入ってきた気がする。」

エザサ：

「まだまだ入口だよ。」

紫外線照射量としては、生残率1/1000の方が3で、1/10の方が1であった。これを同じ量で混ぜると生残率はどうなるでしょう。さっきの生菌数のときと同じように計算すればいいよ。」

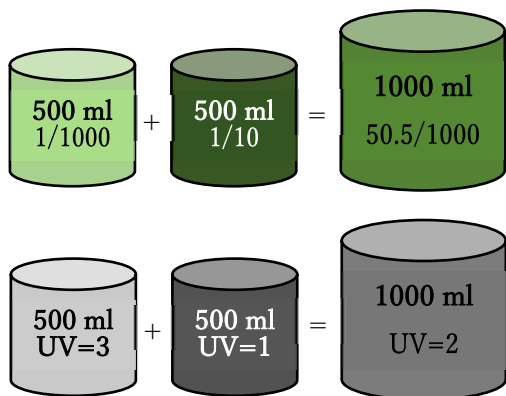
オツカ：

「ということは、それぞれの量を500mlとすると、1/1000×500mlの0.5と1/10×500mlの50とを足した50.5を、体積の1000mlで割ればいいんだから、50.5/1000だね。」

エザサ：

「はい、正解です。では、紫外線照射量を平均するとどうなるか。(3+1)/2というふうには2つの紫外線照射量を足して2で割ると、

答えは2になる。紫外線照射量が2ということは生残率が  $1/10 \times 1/10$  で  $1/100$  のことを意味する。しかしながら、オツカの答えは  $50.5/1000$  だったわけだから、一致しないよね。」



UV=1 ⇒ 生残率=1/10  
 UV=2 ⇒ 生残率=1/100  
 UV=3 ⇒ 生残率=1/1000  
 $UV=1 + UV=3 \rightarrow UV=2 \rightarrow 1/100?$   
 $1/1000 \times 500 \text{ ml} + 1/10 \times 500 \text{ ml}$   
 $= 50.5/1000 \times 1000 \text{ ml}$   
 $50.5/1000 \Rightarrow RED \approx 1.30$

オツカ：  
 「なんか話がややこしいんだけど。」

エザサ：  
 「つまり、紫外線照射量に分布があるとき、それらの紫外線照射量を平均した値から生残率を求めるのではなく、それぞれの紫外線照射量による生残率を平均せよということだ。

$50.5/1000$  の生残率を紫外線照射量で表現すると約 1.30 になる。これが換算紫外線照射量  $RED$  だ。 $RED = -\log_{10}(50.5/1000)$  を

計算すると求められるよ。」

### 微生物の紫外線耐性に依存する $RED$

エザサ：

「さて、最初に『なんでわざわざ  $RED$  の前に『*Kyoushi* 菌』を付けるんだい?』という質問があった。これについて話をしよう。

紫外線照射量 1 で生残率が  $1/10$ 、3 で  $1/1000$  になる微生物を A 菌とする。この半分の紫外線耐性の微生物を B 菌とする。B 菌の場合、紫外線照射量 1 で生残率が  $1/100$ 、3 で  $1/1,000,000$  になる。これを同じ量で混ぜる、生残率は  $5000.5/1,000,000$  となり、 $RED$  ( $= -0.5 \times \log_{10}(5000.5/1,000,000)$ ) は約 1.15 になる。」

オツカ：

「あれ? A 菌のときに  $RED$  は 1.30 だったのに、B 菌では 1.15 になるんだね。」

エザサ：

「そうなんだよ。微生物の紫外線耐性が異なれば、 $RED$  の値が変わるんだよ。だから、 $RED$  の前に微生物の名前を付けないといけないんだ。A 菌  $RED$  とか B 菌  $RED$  というふうだね。」

オツカ：

「B 菌での  $RED$  が約 1.15 になるというところは、正直、付いていけてないんだけど。」

エザサ：

「そこは言葉で説明するより、式にした方がわかってもらえるかな。

生残率を  $S$ 、紫外線照射量を  $UVD$  とすると、A 菌では次式が成り立つ。

$$S = 10^{-UVD} \quad (1)$$

これで、 $UVD$ が1のとき $S$ は0.1になり、 $UVD$ が3のとき $S$ は0.001になる。これを半分ずつ足すと、

$$S = 0.5 \times 10^{-1} + 0.5 \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$S = 50.5/1000 \quad (3)$$

この生残率をA菌 $RED$ で表現すると、

$$S = 50.5/1000 = 10^{-A \text{ 菌} RED} \quad (4)$$

A菌 $RED$  =

$$-\log_{10} \left( \frac{50.5}{1000} \right) \cong 1.30 \quad (5)$$

一方、B菌では次式が成り立つ。

$$S = 10^{-UVD/0.5} \quad (6)$$

これで、 $UVD$ が1のとき $S$ は0.01になり、 $UVD$ が3のとき $S$ は0.000001になる。これを半分ずつ足すと、

$$S = 0.5 \times 10^{-2} + 0.5 \times 10^{-6} \quad (7)$$

$$S = 5000.5/1,000,000 \quad (8)$$

この生残率をB菌 $RED$ で表現すると、

$$S = 5000.5/1,000,000 = 10^{-B \text{ 菌} RED/0.5} \quad (9)$$

B菌 $RED$  =

$$-0.5 \times \log_{10} \left( \frac{5000.5}{1,000,000} \right) \cong 1.15 \quad (10)$$

となる。」

#### 【A 菌】

$$UV=1 \Rightarrow \text{生残率}=1/10$$

$$UV=2 \Rightarrow \text{生残率}=1/100$$

$$UV=3 \Rightarrow \text{生残率}=1/1000$$

$$1/1000 \times 500 \text{ ml} + 1/10 \times 500 \text{ ml} = 50.5/1000 \times 1000 \text{ ml}$$

$$50.5/1000 \Rightarrow \text{A 菌 } RED \cong 1.30$$

#### 【B 菌】

$$UV=1 \Rightarrow \text{生残率}=1/100$$

$$UV=2 \Rightarrow \text{生残率}=1/10,000$$

$$UV=3 \Rightarrow \text{生残率}=1/1,000,000$$

$$1/1,000,000 \times 500 \text{ ml}$$

$$+ 1/100 \times 500 \text{ ml}$$

$$= 5000.5/1,000,000 \times 1000 \text{ ml}$$

$$5000.5/1,000,000 \Rightarrow \text{B 菌 } RED \cong 1.15$$

### REDと微生物の紫外線耐性との関係

エザサ：

「式(1)、(6)を一般式にしてみると、微生物の生残率を1/10にするために必要な紫外線照射量を $D_{10}$ とすれば、

$$S = 10^{-UVD/D_{10}} \quad (11)$$

となり、2つの紫外線照射量 $UVD1$ と $UVD2$ が $p : 1-p$ の割合で分布していると仮定すると、生残率は

$$S = p \cdot 10^{-UVD1/D_{10}} + (1-p) \cdot 10^{-UVD2/D_{10}} \quad (12)$$

また、 $RED$ は、

$$S = 10^{-RED/D_{10}} \quad (13)$$

より、

$$10^{-RED/D_{10}} = p \cdot 10^{-UVD1/D_{10}} + (1-p) \cdot 10^{-UVD2/D_{10}} \quad (14)$$

よって、

$$RED = -D_{10} \cdot \log_{10}[p \cdot 10^{-UVD1/D_{10}} + (1-p) \cdot 10^{-UVD2/D_{10}}] \quad (15)$$

となる。」

オツカ：

「なんだか、余計に分からなくなった気がする。でも、式(15)を Excel で計算するなら、下のように入力すれば式(5)と(10)の RED が求められたよ。」

	A	B	C	D	E
1		A菌	B菌		
2	D10	1	0.5		
3	p	0.5	0.5		
4	UVD1	1	1		
5	UVD2	3	3		
6	RED	1.2967	1.1505		

=-1\*C2\*LOG10(C3\*10^(-(1\*C4/C2)+(1-C3)\*10^(-(1\*C5/C2))))

エザサ：

「やるじゃないか。それでは、この Excel を借りて  $D_{10}$  をどんどん大きくすると RED がどのように変化するか調べてみよう。 $D_{10}$  を 0.01 から始めて 10 倍ずつ大きくしていくと、RED が 2 に近づくことがわかるね。この 2 という値は、紫外線照射量の平均を示している。つまり、 $D_{10}$  をどんどん大きくすると RED が紫外線照射量の平均に収束する。これを式で表すと次のようになる。」

$$\lim_{D_{10} \rightarrow \infty} RED = p \cdot UVD1 + (1-p) \cdot UVD2 \quad (16)$$

D10	0.01	0.1	1	10	100	1000
p	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
UVD1	1	1	1	1	1	1
UVD2	3	3	3	3	3	3
RED	1.003	1.0301	1.2967	1.8859	1.9885	1.9988

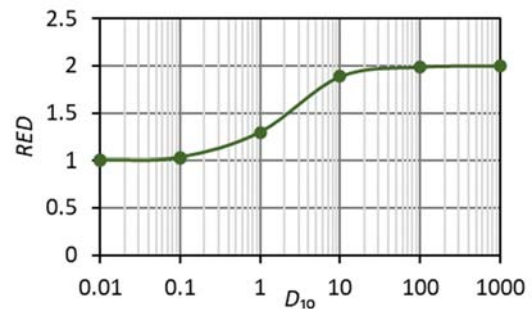
もう一つ気が付く点として、 $D_{10}$  をどんどん小さくすると RED が UVD1 に近づいていることがわかる。これを式で示すと、

$$\lim_{D_{10} \rightarrow 0} RED = UVD1 \quad (17)$$

ただし、

$$UVD1 < UVD2 \quad (18)$$

ということで、 $D_{10}$  をどんどん大きくすると RED が UVD1 から紫外線照射量の平均へと徐々に大きくなる。上の Excel の結果をグラフ上にて線で結ぶと、下図のようになる。



以上のことから、紫外線耐性の高い ( $D_{10}$  が大きい) 微生物を用いると RED の値が大きくなるということだ。なぜなら、 $D_{10}$  が小さくなれば紫外線照射量分布の中の小さい値の影響で不活化率が低くなるため、RED は小さくなる。一方、 $D_{10}$  が大きくなれば RED は紫外線照射量に対して指数関数比例しなくなり、紫外線照射量の平均に近づくからだといえる。」

### 病原性微生物 B 菌と安全かつ取扱い容易な微生物 A 菌

エザサ：

「さて、ここでは最初に作成してくれた Excel を参考に、次の L 列 M 列のように計

算してみた。病原性微生物が B 菌の方で、安全かつ取扱いが容易な微生物が A 菌だったとしよう。病原性微生物 B 菌を 99.9% 不活化する (B 菌 RED を B 菌の  $D_{10}$  の 3 倍である 1.5 にする) ように、UVD1 を 1.35 に変更した。先と同様に、UVD2 は UVD1 の 3 倍である。B 菌での性能評価試験は危険なので、B 菌を 99.9% 不活化できることを A 菌で試験しなければならない。この Excel の計算は、A 菌 RED が 1.65、もしくは A 菌の不活化率が 0.978 であれば、B 菌を 99.9% 不活化できることを示している。ただし、こんな計算ができるのは、p、UVD1、UVD2 で示された紫外線照射量分布がわかっているからだ。もし、O 列、P 列のように p が 0.15 であれば A 菌 RED の値は全く異なってしまう。

	A	L	M	N	O	P
1		A菌	B菌		A菌	B菌
2	D10	1	0.5		1	0.5
3	p	0.5	0.5		0.15	0.15
4	UVD1	1.35	1.35		1.09	1.09
5	UVD2	4.05	4.05		3.27	3.27
6	RED	1.6502	1.5005		1.8979	1.5019
7	不活化率	0.9776	0.999		0.9874	0.999
8					=1-10 <sup>^</sup> (-1*M6/M2)	
9						

最初にも話題になったが、A 菌を 99.9% 不活化できるなら B 菌は余裕で 99.9% 不活化できるから文句なし。しかし、それでは過剰照射ともいえる。紫外線照射装置 JWRC 技術審査基準 (2019、水道技術研究センター) では、このような RED の特性が考慮されているんだ。」

オツカ：

「確かに、B 菌の  $D_{10}$  より A 菌の  $D_{10}$  の方が大きい値なんだから、B 菌 RED より A 菌 RED の方が大きくなる。これはさっきのグラフとか Excel の計算とかから示されたことだしね。だから、B 菌 RED を 1.5 にしたいとき A 菌 RED も 1.5 にすればいいかというと、これでは性能不足だ。でも、A 菌の不活化率を 99.9% にする性能を求めることは過剰照射だということだね。」

エザサ：

「合格！では、その審査基準の中身を少しだけ説明しよう。水道原水中の存在するクリプトスポリジウムを紫外線照射装置に通水した場合に、99.9% 以上不活化することが可能であるかどうかを判定するための審査内容になっている。通水して性能評価試験をする場合、クリプトスポリジウムとは紫外線耐性の異なる微生物を使用するので、RED の特性を考慮して審査基準が作成されているんだ。」

### RED と紫外線強度との関係

エザサ：

「審査基準の話をする前に、紫外線強度は光源の劣化とともに低下することを知った上で、紫外線強度と RED との関係を把握しなければならぬ。これも RED の特性の一つだ。」

オツカ：

「紫外線強度が半分になれば、RED も半分になるんじゃないの？」



エザサ：

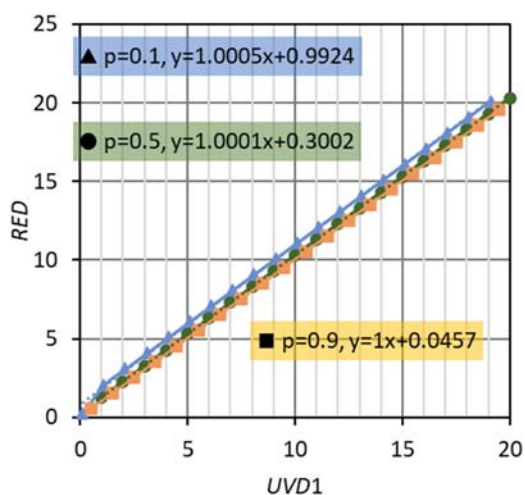
「そうじゃないんだ。」

オツカ：

「REDの特性は、いつも直感とはズレるんだな。」

エザサ：

「先程から使っている Excel を用いて、計算した結果をグラフにしてみたよ。」



ここでは、 $D_{10}$ を1、 $UVD2$ は $UVD1$ の3倍として、 $UVD1$ を1~20程度の範囲で変化させREDを求めた。 $p$ は0.1、0.5、0.9とした。各 $p$ の結果は、概ね正の切片を持つ比例式に近似した。

切片が正ということは、 $UVD1$ が半分になってもREDは半分より大きいことを意味する。

実際に装置を用いて試験するとき、光源を含めてすべてが新品状態だ。それが次の保守点検で部品交換や清掃をするまで、既定の性能を確保しなければならない。装置の性能評価試験は新品状態で行うわけだから、この特性を考慮して装置性能評価試験の合格基準値を決めているんだ。」

オツカ：

「ややこしい。」

エザサ：

「実際には単純で、既定性能をRED1として、装置が新品状態から保守点検までの間に紫外線強度が半分になるとわかっているなら、新品時の目標性能を $2 \times RED1$ に設定する。これであれば、安全側に目標設定していることになる。という話だ。」

オツカ：

「目標性能を $2 \times RED1$ に設定しておけば、保守点検時に紫外線強度が新品時の半分になっても、既定性能のRED1以上のREDになるということだね。」

エザサ：

「わかってもらえて、うれしいぞ。」

### RED bias

エザサ：

「アメリカのEPAではRED biasを用いて、クリプトスポリジウムの目標不活化率を得るために確保すべき供試微生物のREDを定めた。」

オツカ：

「何それ？」

エザサ：

「RED biasを説明するために、前に作成してくれた Excel を用いてみよう。」

L列M列の計算では、B菌REDを1.50にするためにはA菌REDは1.65を確保しなければならないことを示している。この

場合、RED biasは  $1.65 \div 1.50$  の約 1.10 となる。」

	A	L	M	N	O	P
1		A菌	B菌		A菌	B菌
2	D10	1	0.5		1	0.5
3	p	0.5	0.5		0.15	0.15
4	UVD1	1.35	1.35		1.09	1.09
5	UVD2	4.05	4.05		3.27	3.27
6	RED	1.6502	1.5005		1.8979	1.5019
7	不活化率	0.9776	0.999		0.9874	0.999
8	RED bias	1.10			1.26	
9					=L6/M6	

オツカ：

「そんなことか。簡単だ。」

エザサ：

「その後に示した、異なる紫外線照射量分布ではどうだろう。O列P列の場合、RED biasは  $1.90 \div 1.50$  の約 1.26 となる。このように、紫外線照射量分布が異なれば RED biasも違う値を示す。」

オツカ：

「それじゃ、紫外線照射量分布がわからなければ、RED biasはわからないということだね。でも、性能評価試験ではREDはわかるけど、紫外線照射量分布はわからないんだよね。」

エザサ：

「そうなんだよ。だから、RED biasを決めたんだよ。たくさんの装置のデータから、これくらいの値にしておけば安全だろうというふうにして。詳細は不明なんだけどね。」

オツカ：

「それでは日本の場合はどうなの？」

エザサ：

「日本でも複数の装置のデータから、RED biasは決めたんだ。日本の場合、クリプトスポリジウムを 99.9%不活化することができる装置を対象に、クリプトスポリジウム以外に Q $\beta$  や MS2 についても CFD-I を用いて RED を計算し、RED biasを求めた。」

オツカ：

「CFD-I って何？」

エザサ：

「そうだった。まだ説明していなかった。紫外線照射量分布を計算で求める方法だ。詳細は後で説明する。日本では根拠がはっきりしていて、RED biasは 2 に決まった。そのときに使用する供試微生物の紫外線耐性は MS2 と同等以下であることとなっている。」

オツカ：

「アメリカではいくつだったの？」

エザサ：

「供試微生物の紫外線耐性が MS2 と同等なら、約 1.4 だった。」

オツカ：

「日本の方が安全サイドだね。」

エザサ：

「実際にデータを集めてみると、1.7程度の場合もあったからなんだ。」

オツカ：

「それで2にしたわけか。」

エザサ：

「RED biasが決まったので、紫外線耐性がMS2と同等以下の供試微生物を用いて、性能評価試験での目標REDが決まった。また、装置新品時に対する保守点検時での紫外線強度の低下のことを考慮することも示された。これで、性能評価試験結果からクリプトスポリジウムを99.9%不活化できるかを判定できるわけだ。」

オツカ：

「ちなみに、RED biasが1という場合はどんなことを意味するの？」

エザサ：

「それは紫外線照射量に分布がないことだよ。水の流れにも紫外線強度にも分布があるんだから、紫外線照射量に分布がある。」

RED biasを2にしたということが、さっき言った過剰照射になっていないことを意味するんだよ。」

オツカ：

「そこに結び付くの？」

エザサ：

「クリプトスポリジウムの $D_{10}$ が4 mJ/cm<sup>2</sup>で、MS2の $D_{10}$ が約20 mJ/cm<sup>2</sup>だから、5倍違うよね。ということは、ともに同じ不

活化率になることを目指したら、RED biasは5になる。それに比べたらRED bias 2というのは過剰になっていないでしょ。」

オツカ：

「ちょっと待って。同じ不活化率になることを目指したら、RED biasは5になるんだっけ。」

エザサ：

「正確には、指数関数比例する場合だけだね。式(13)または(15)を見ればわかるでしょ。下の計算結果がその3つの例だ。左の例はUVD1が同じ場合で、真ん中の例がRED bias 2の場合、右の例がRED bias 5の場合だ。クリプトの計算は3つとも同じになっている。MS2のUVD1を真ん中と右で比べると右が以下に過剰照射かがわかるでしょ。」

オツカ：

「本当だ、UVD1を比較すると真ん中と右では右の方が2.6倍ぐらい過剰だ。それと、RED biasが5の場合のUVD1をMS2とクリプトで比較すると、ちょうど5になるんだね。」

エザサ：

「それも、式(15)を見ればわかるでしょ。MS2とクリプトの $D_{10}$ も5倍差だからね。」

オツカ：

「REDの特性はいつも直感からズレるけど、この場合は直感どおりになるんだ。」

	MS2	クリプト	MS2	クリプト	MS2	クリプト
D10	20	4	20	4	20	4
p	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
UVD1	11	11	18.6	11	55	11
UVD2	33	33	55.8	33	165	33
RED	16.357	12.204	24.502	12.204	61.021	12.204
不活化率	0.8479	0.9991	0.9404	0.9991	0.9991	0.9991
RED bias	1.34		2.01		5.00	

## CFD-I

エザサ：

「先程の CFD-I について説明するね。」

オツカ：

「CFD は Computational Fluid Dynamic (数値流体力学) のことですよ。その1番目ってことか？」

エザサ：

「いや、I は intensity のことだよ。紫外線強度(UV intensity)の強度のこと。CFD に紫外線強度の計算を加味して、紫外線照射量分布を求める計算だから。」

オツカ：

「おう！紫外線照射量分布を求めることができるのなら、今までと違ってクリプトスポリジウムREDそのものを計算することができるね。」

エザサ：

「はい、そのとおり。」

## 安全率

オツカ：

「CFD-I の場合の RED bias は？」

エザサ：

「性能評価試験だけで判定する場合のように決まった RED bias を使用していない。」

RED bias を決めなければならなかった理由は、紫外線照射量分布がわからないからだったね。CFD-I の場合は、紫外線照射量分布がわかるので、決まった RED bias を使用する必要がないんだ。たとえば、さっきの Excel 計算では、左の例のように p、UVD1、UVD2 が同じ場合が CFD-I を用いた場合に相当する。」

オツカ：

「それだと、性能評価試験だけで判定する場合より安全率が少ないように思うけど。」

エザサ：

「確かに安全率はその場合より低くなる可能性がある。CFD-I を用いた場合の安全率として何があるかという、一つは RED と紫外線強度との関係のところでは示した新品時に必要とする RED を保守点検時の RED の 1/f 倍にすることだ。この f とは新品時の紫外線強度に対する保守点検時の紫外線強度の維持率である。RED と紫外線強度との関係のところでは f を半分、つまり 0.5 で話していたよね。これは性能評価試験だけで判定する場合にも適用される安全率だ。」

オツカ：

「他には何があるの？」

エザサ：

「CFD-I を用いる場合、CFD を使いこなせるかを確認するために、定められた装置について、流れの分布図とか滞留時間の分布図とかが見本と一致するかを調べる。」

オツカ：

「それで？」

エザサ：

「それが一致したら、性能評価試験を行ってREDを求め、その結果と CFD-I で求めたREDの計算結果とを比較して、性能評価試験の結果の方がREDの値の方が大きければ、その CFD-I を使用しても良いということにしているんだ。この両者のREDの差が安全率となる。」

オツカ：

「CFD-I で判定する場合も性能評価試験はするんだ。」

エザサ：

「するよ。ただし、同系列の装置では CFD-I だけになる。これが CFD-I で判定する場合の最大のメリットだ。」

オツカ：

「なんでそこがメリットなの？」

エザサ：

「同系列の装置には、性能評価試験に使用した装置の 10 倍を流す装置だってあるんだ。そんな装置の性能評価試験をする必要がないからだ。」

オツカ：

「実際に試験をしようとする、大きな設備が必要で、大変だもんね。」

エザサ：

「これで、REDに関連する説明は終了した。」

## テスト

エザサ：

「さて、ここで問題です。」

オツカ：

「来た！」

エザサ：

「指数関数比例する 2 つの微生物 A 菌と B 菌がいたとする。A 菌は B 菌の 2 倍の紫外線耐性である。今、A 菌を 90%不活化できる装置に B 菌の入った水を流すと、B 菌はどれだけ不活化できるでしょうか。」

オツカ：

「指数関数比例するんだから、99%だよね。」

エザサ：

「ガーン！何にもわかってきていない。ていうか、一番おいしい間違いをしたな。」

オツカ：

「冗談だよ。答えは、『紫外線照射量分布がわからないと答えられない』というのが正解でしょ。」

エザサ：

「そのとおり。もうちょっと何か言えないかい？ 答えを予測するようなコメントをしてほしいな。」

オツカ：

「紫外線照射量に分布がなければ、99%になる。」

エザサ：

「そうそう。もう一声！」

オツカ：

「でも、紫外線照射量には分布があるから、99%より低くなるだろう。さすがに、90%以下なんてことにはならないけどね。」

エザサ：

「OK！では、REDを使ってコメントしてみよう。せっかく、REDのことを議論してきたんだから。」

オツカ：

「REDはA菌REDの方がB菌REDより大きくなる。紫外線耐性が高いから。」

エザサ：

「はい、正解です。お疲れ様でした。」