

研究展望

流域の水管理、水循環のトータルシステム

WATER RESOURCES MANAGEMENT AND URBAN WATER/WASTE WATER METABOLIC SYSTEM

眞柄 泰基

Yasutomo MAGARA

正会員 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)*Key Words* : public health, water resources, water supply sanitation sewerage system

1. はじめに

江戸の水道は1654年に建設され玉川用水によって、多摩川の上流、羽村地点から毎秒6m³を43kmにわたる用水路で導水した水を、木管等で町中に設けた用水井戸に配水し、当時世界最大ともいわれた人口130万人の生活を支えていた。この玉川用水は現在でも東京都水道局の導水施設として利用されているが、多摩川の水は特別の処理を行わなくても、江戸の市民にはコレラやチフスのような重篤な感染症の発生はなかった。それは、わが国にコレラやチフスの原因となる感染性微生物がまだ侵入していなかったからである。ヨーロッパ諸国もアフリカ、アメリカ、アジアと進出するにつれて、それまでなかった感染症が移入され、当時でいえば新興感染症であるコレラやチフスが頻繁に発生するようになった。尿尿汚染の少ない上流部へ水源を求めていったが、やがて限界に到達し1829年にエドウィンチャドウィックがテムズ川の水に緩速濾過を行ったのが今日の浄水処理の始まりであり、コッホが細菌を発見する以前、1855年に疫学の始祖といわれるジョンズノーが緩速濾過をした水が供給されている地区でのコレラの発生が低いことを統計学的に証明したこともあって、河川水等を処理して、圧力管で供給するという今日の水道が完成していったのである。

1860年代になると、コレラが長崎を経て各地でコレラが発生するようになった。1870年開港地である横浜で3万人がコレラで死亡し、わが国初めての疫学調査が実施され、その原因が糞尿で汚染された側溝とそこから浸透し、汚染した地下水を利用している井戸水であることが明らかとなった。これは、ジョンズノーがロンドンで行った疫学調査からわずか15年後のことであり、明治政府の国際化の拠点としての横浜の意義を認識し、それが1888年横浜で緩速濾過した水を圧力管で供給するという近代水道の実現へと向かっていったのである。全ての建設用の資機材は英国から

輸入して建設されたのであり、いかに開国によりもたらされた新興感染症がわが国にとって脅威であったかを物語っている。横浜のような新興感染症の猛威により、東京や開港都市で次々と近代水道が整備されていったのである。

第二次世界大戦へと進む富国強兵政策のなかで、渡良瀬川上流の銅鉱山廃水の影響を受けた谷中村の廃村、繊維染色工場廃水による農業用水の汚染問題等の水質汚濁係争や大牟田市等の集団消化器感染症が頻発していた。しかし、第二次世界大戦の終結は、明治の開国と同様に、新興・再興感染症の脅威をもたらしたのである。その原因は、終戦に伴い海外からの帰国者や占領軍とともにもたらされた感染性生物、水道を含めて破壊された社会基盤施設、極度に貧困な栄養水準等が挙げられる。このようなことから占領軍総司令部は1945年に、水道における塩素消毒の義務づけと、上下水道分野の技術者の再教育を占領軍の命令として発し、感染症対策としての上下水道のレベルアップを図ろうとしたのである。明治以来の水道は英国・ドイツ等ヨーロッパ系の水道が整備されてきたが、米軍を核とする占領軍総司令部の衛生技術者によってアメリカ流の水道が整備されるようになり、その系譜は今日まで続いている。

新しい憲法が定まり、憲法25条の生存権事項に公衆衛生の向上が国民と国の権利義務として明言されたことにより、1957年の水道法、廃掃法等公衆衛生に関係する一連の法律が制定され、それぞれの目的に、例えば水道法が「豊富、低廉で清浄な水道水を供給することによって公衆衛生の向上に資する」と水道の目的を明らかとしているように、感染症対策として水道を含め社会基盤施設の整備が国策として展開されるようになったのである。すなわち、大都市を中心とする水道から、農山漁村まで水道を整備することとなったのである。

2. 水道普及促進の時代

水道水の供給と尿尿の衛生処理率の向上にともなうて、その普及率や整備率が図-1に示すように70%を超えるようになる1970年代に入ると、図-2に示すように消化器系感染症は実質的に制御することが可能となった。ポリオは生ワクチンの接種によって激減したが、赤痢やチフスは尿尿の衛生処理と塩素消毒された水道水が供給されるとともに、食品衛生等公衆衛生分野の活動と相俟って低減化されたのである。

水道の普及率の向上にともない、都市活動を含めて洗濯機、家風呂等水を多用する機器の普及をもたらし、一人あたりの水使用量を増加させ、その普及に合わせるべく水道施設の建設や拡張事業が全国で展開されたのである。その結果は、図-3に示すように、1970年の年間給水量約70億 m^3 から、今日の150億 m^3 と倍増をした。この増加する水量に対応するため水資源施設の建設が行われ、河川の自流水の占める割合が低下し、ダム等停滞水域の占める割合が増加し、今日では両者が拮抗して全体の約35%ずつを占めるようになった^{2),3)}。

水道水の需要増に対応するために建設された水資源施設は、国土に新たに建設された水環境であり、その水環境についての科学的な知見が不十分なまま、量の確保という命題を満たすべく創成されたのである。植物生産性が高い中緯度地帯に属する国土に、新たにダム湖という停滞水域が出現すれば、必然的に植物生産、即ち植物プランクトンの出現を招くことは、今日では常識であるが、かつてはそのことへの関心は低か

ったといわざるを得ない。しかも、ダムから需要地点まで専用の導水施設が整備されたことは少なく、ダムを水資源賦存量の平準化目的で整備したため、河川の自流水も植物プランクトンの影響を受けた水ということになる。農業活動で化学肥料が多量に用いられ、合成洗剤

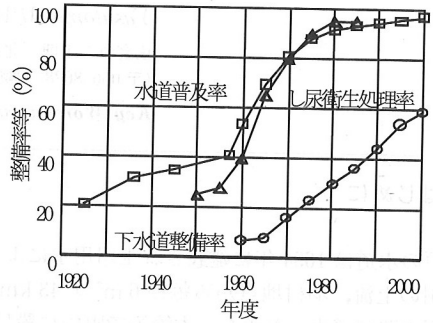


図-1 水道、尿尿衛生処理、下水道の推移

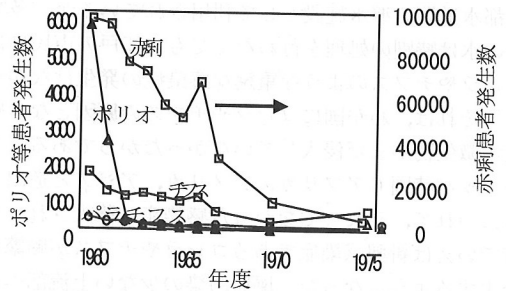


図-2 わが国の感染症の推移

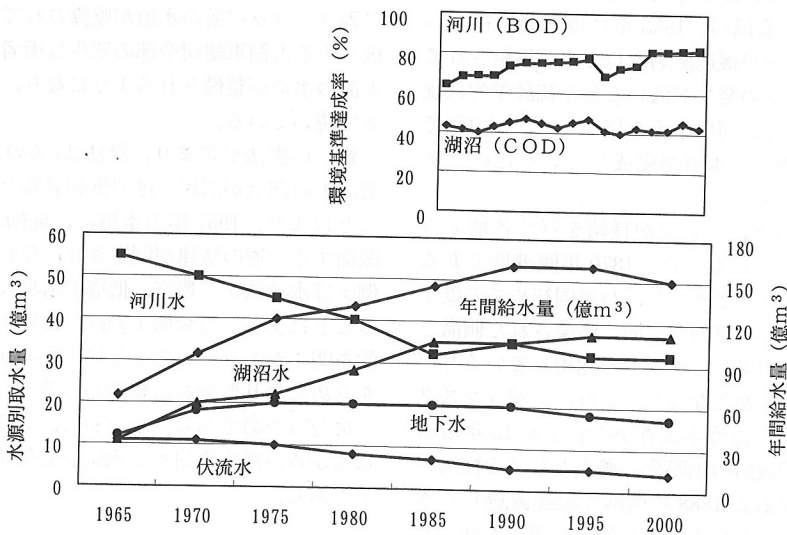


図-3 水道水源の厚生と環境基準の推移

の添加剤にリン化合物が使用されたこともあって、停滯水域の栄養塩類濃度の増加、即ち富栄養化に伴うプランクトンの増殖は、水道水の水質に多大の影響を及ぼすに至ったのである。

尿尿の衛生処理は感染症対策として有効であったが、図-2に示すように下水道の普及により公共用水域の水質保全を計画的に図られるようになったのは1970年代に入ってからである。水道水を含め水を使えばそれとほぼ同量の廃水が発生するのであり、尿尿以外の生活雑排水は下水道が未整備の間はそのまま公共用水域へ排出されるのである。今日、下水道整備率は約60%にまで達したが、その整備は政令都市のそれが著しく高く、水道水源である上中流部の都市のそれは高くない。政令都市のうちで内陸にあるのは京都市のみであり、それ以外の都市は河川の下流部あるいは沿岸部に位置し、下水処理水の多くは海域へ排出されている量が多く、本来、淡水域に存在すべき水資源が海域へ排出されているという意味で健全な都市水循環系を構築してきたことと大きな差異はないといわざるを得ない。

環境基本法（旧公害対策基本法）により達成することが望ましい環境基準が定められ、その環境基準を達成するための方策の一つとして水質汚濁防止法に定める排水基準が定められた。この排水基準は環境基準の10倍としてこれまで定められてきている。これは、排水が公共用水域で10倍に希釈されることを期待しているということである。しかし、環境基準や排水基準の制度が発足した1970年代当初での、水資源賦存

量に対する水利用率は都市用水、工業用水を含めて現在の半分であったが、今日では全国平均ですら10%を超える状況にある。すなわち、地域的に見れば環境基準が達成できないのは当然のことであり、これは図-3に示す環境基準達成率の推移が如実に示している。

水道を含めて都市用水の使用量が増加することによって、感染症対策をはじめとして多くの便益をもたらしてきたが、その一方で、公用水域、なかでも淡水域に対しては水環境に多くの変化をもたらした。それは、水環境における生態系への影響もあるが、都市用水システムそのものの持続性を危うくするという様相の顕現が生じている。例えば、水道水の異臭味、消毒副生成物、生物資化性有機物質等汎用浄水システムで対応できない新たな水質障害によってである。

3. 水道での対応

水道水源の変化による水道施設の限界が明らかになったのは1978年に東京都の玉川浄水場が給水を停止し、1981年に厚生省がトリハロメタンについての規制通知を出し、さらに、1980年頃から湖沼など停滯水域を水源としている水道で藻類が原因の異臭味障害が多発したからである。トリハロメタンの規制通知により水道水中の微量有機化学物質が測定されると、地下水を原水としている水道水からトリクロロエチレン等揮発性有機化学物質が検出される頻度が高いことが明らかになり、それを契機として環境省が実施した地

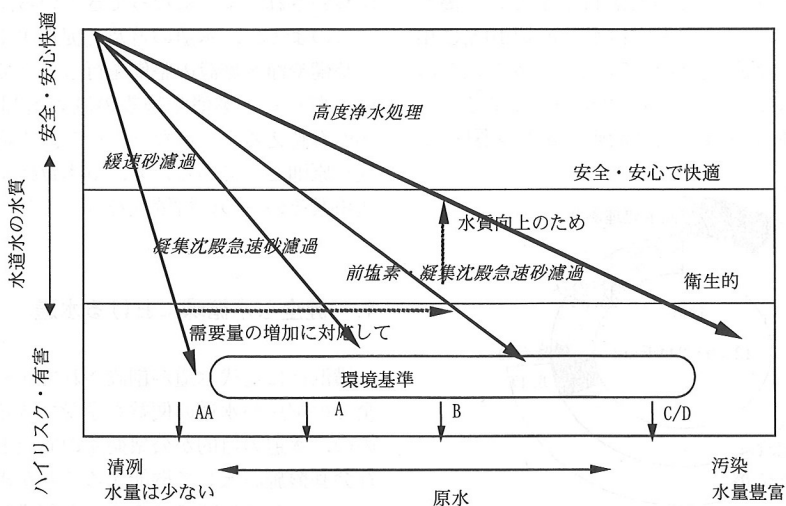
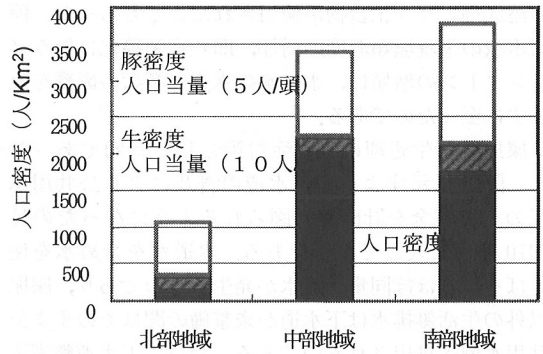


図-4 水道原水と浄水処理方式

下水調査によりそれらによる地下水汚染が全国的規模で認められた。このように、感染性生物やかたてヒトで健康障害が確認された化学物質と、水道の利便性の視点から定められてきた水質基準とそれを満たすために整備されてきた水道施設では、国民の健康や水道への信頼を満たすことができないようになったのである。

農薬や鉛等についての規制的な通知により水道水の水質管理をレベルアップを図ってきたが、1994年に水道水質基準の改定を行うことで、健康障害や利便性障害の蓋然性を前提とした基準から、健康リスクや利便性リスクを前提とした基準へと移行することにより、水道水の水質を生産汚染リスクから見てワンオーダー小さいところに求めるようにしたのである。その結果、図-4に示すように、改正された水質基準に対応するため環境基準生活環境項目B類型に属する水道原水を利用しているところでは、オゾンや活性炭吸着のような高度浄水処理プロセスを付加した浄水施設に改良することが必要となった。このようなことから、関東、関西の大都市水道では高度浄水処理プロセスを付加した浄水場へと改良が進んでいるものの、図-5に示すようにその進捗は遅い。中小規模水道はその財政的な困窮さから、高度浄水処理プロセスの導入が難しいことから、水道水源の水質改善により対応をはかることも一つのオプションであり、1995年に水道水源保全二法が制定された。しかし、この法律に基づいて水道水源の保全のための施策を実施した水道事業者は少ない³⁾。

水道水の供給量の増加は、水質ばかりでなく水量においても、10年降雨確率を前提とする利水安全度を満たすことができない水道事業者が多い。沖縄県では1992年まで頻繁に発生していた隔日給水という渇水被害に対応するため、一日平均給水量の約10%に相当する海水淡水化施設を整備している。しかし、そのコストは淡水を水源とするものの2倍以上である。淡水であっても、水源流域の人為活動の影響を図-6に



(首都圏：人口密度1000、牛密度150、豚密度550人/Km²)

図-6 沖縄県の水源域の人口密度

示すように強く受けているため、わが国で最も複雑で、高度な技術を必要とする施設を整備しなければならない状況にある。このようなことは、首都圏を含め水資源賦存量に対する水使用率の高い地域で共通のことである⁴⁾。

河川の上流から下流にかけて取水と排水を繰り返すわが国の一般的な水代謝システムは、水道水の化学物質によるリスクを高めるばかりでなく、1996年埼玉県越生町で発生したクリプトスポリジウム症の集団発生によって、今日でも新興感染症のリスクが存在することを再認識させた。この直接の原因は越生町の水道取水地点上流に農村集落排水処理施設の排水口が設けられたことと、それへの対策が十分でなかったことがあげられる。この越生町の事例から、クリプトスポリジウムを完全に除去できる膜濾過という、これまでの浄水処理のブレイクスルーである新しい浄水処理が整備されるようになってきている。

このように、水道の普及を促進するため水資源施設の整備や浄水施設の整備を行ってきているが、施設整備に要した企業債や施設の減価償却費が全体経費の50%を超えるようになってきている。水道事業は独立採算性を原則としているため、資本費比率の高い状況は水道事業そのものの持続性を危うくしつつある³⁾。

4. 健全な水循環における水道

横浜市に近代水道が創設されてから1世紀を超え、全ての国民が水道の便益を享受できるようになったものの、水道の目的が公衆衛生の向上という段階から、社会基盤施設として機能することが求められる段階に入ったことの反映であることを認識しなければならない。すなわち清浄な水道水を供給するばかりでなく、

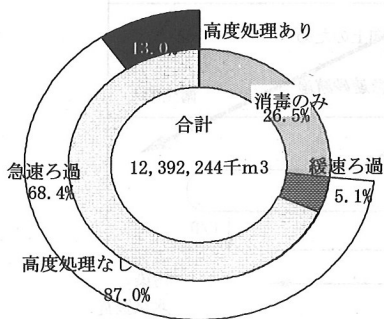


図-5 浄水処理方式の状況

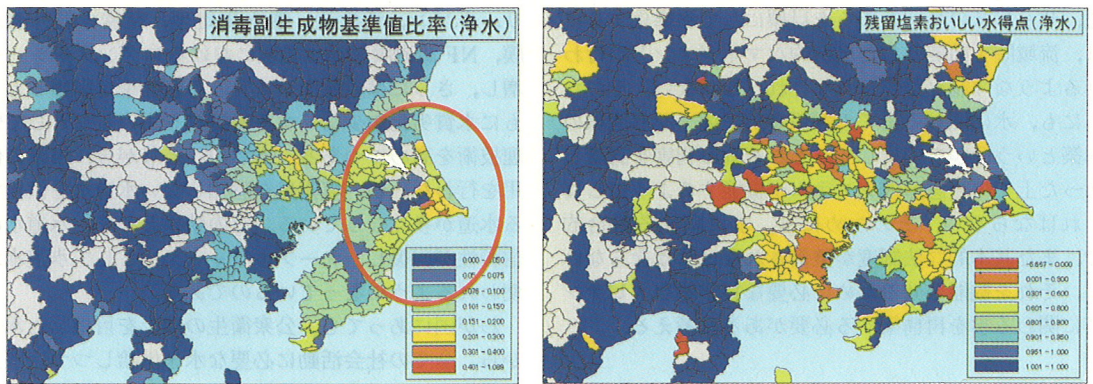


図-7 水道水の消毒副生成物と残留塩素の分布

様々な用途に利用されている水道水を絶えず供給されていなければならないからである。すなわち、かつては許容されていた一時的な断水すら許容されなく、給水を停止出来ない水道を構築することが必至な状況にあるということである。

一方、21世紀初頭の我が国は、まもなく人口減少時代に突入し、これまでの右肩上がりの人口の趨勢は終焉を迎えようとしており、また20世紀に整備された水道施設の多くが老朽化しその更新が課題となるなど、大きな転換点に立っている。一方、官と民、国と地方の役割分担の見直し、グローバルゼーション、市町村合併等の地方自治の枠組みを巡る動きなど、我が国の水道を取り巻く環境は大きく変化している。水道分野もこれまでの発展に立脚して、こうした課題に対処しつつ、国民への給水サービスを一層向上させるための新たな取り組みを着実に展開する時期にきている。そのためには、水道の安定・安心をキーワードにして新たな水道システムを水循環の枠組みのなかで構築しなければならない。

安定的な水の供給の前提は水源の確保であるが、今日、ダム等の水資源開発施設の建設により、全国的な水需給バランスは概ね確保されつつある。しかしながら、水資源はローカルな資源であり、地域によっては、必要な水資源の確保を今後とも図る必要がある。さらに、近年の少雨傾向によって水資源開発施設が当初計画された水量を安定して供給できなくなったり、渇水が頻発している水系も見られる。また、地球温暖化は、洪水による災害の発生、異常少雨の頻発、使用水量の増加等の水利用形態の変更といった水資源の根幹を揺るがす事態をもたらすおそれがある。しかし、人口減等によらない水需要は今日の20%程度は減少すると仮定したとき、その余剰ともなる水資源や水資源施設をどのように活用するかが課題となってくる。

水道水の水質を全国的に俯瞰するとき、水質基準に定められている項目のうち消毒副生成物と残留塩素を除いて水質基準値に比べて低い、すなわち良質な水道水が供給されていると考える。しかし、消毒副生成物であるトリハロメタンと残留塩素については図-7に示すように地域的に大きな格差がある。しかも、消毒副生成物は水道原水に含まれるごく一般的な有機物質が塩素と反応するものであり、しかも、発ガン性を有するとされているものも含まれており、健康影響リスクの代替指標として扱うことができる化学物質群である。残留塩素は感染性微生物のバリアーとして水道水の衛生性を確保しなければならないものではあるが、一方では、異臭味の点から水道利用者が水道水の質に対して最も鋭敏に反応する代替指標でもある。この二律背反的な水質が、地域的な差異があることが、水道事業の持続性を危うくしている原因であると言っても過言ではないと考える。

河川の下流に存在する浄水場は、一般的に上流流域における下水処理場等の放流口の下流で取水せざるを得ない場合が多く、薬品コストの増大等のデメリットが発生している。このような状況を回避するための措置として、上下水道の取排水系統の再編や、取水位置の上流への変更、伏流水の取水が有効である。また、上流取水の効果には、薬品コスト等の削減の他に送配水に要するコストの削減も期待され、水道システムの環境負荷の低減に資する⁹⁾。このような、取水、排水位置の適正化、上流取水による水道システムの再構築について、河川の流域単位での関係者間の調整検討を積極的に進める必要がある。このような水資源の有効な活用を図るために、水需要量の減少に伴う余剰水資源を水循環の健全性を回復するために活用することが考えられなければならない。

地域的な水道水の質を含めた水道サービスの格差

を、サービスの高いところを目標にして平準化するには、流域圏を前提とした広域的なマネジメントが行われるような体制が整備されなければならない。そのためにも、水に関わる全ての関係者が、健全な水循環の構築という命題を前にして、それぞれの利害を認識しあった上での合意形成システムが機能するようにしなければならない。そのためには、水に関する総合的で、また基本的な法制度が整備されなければならないし、それを機能させるために必要な科学的なエビデンスに関わる学を再構築する必要があると考える。

5. おわりに

水道法に定める水質基準が平成16年4月から施行されることとなっている⁹⁾。この新水質基準は、これまでの全国一律の基準体系から水道事業ごとの背景を基に柔軟に運用できるように変わることとなっている。また、厚生労働省では21世紀中葉までを見て水道の在り方について検討し、そのビジョンを近く明らかにしようとしている。これには、世界の水道で官民パートナーシップによる水道事業が積極的に展開されており、このような事業展開を進める上でのベンチマークを設定することが水道利用者の便益を担保するものであるという考えが反映されている。

工業先進国で表流水の占める割合が高いのはイギリスと米国であり、ドイツなどは地下水の占める割合が高い。しかし、残留塩素の保持ということになるとヨーロッパ諸国では残留塩素の保持を義務づけしていない。塩素処理を行っていない水道事業体も多い。それは、塩素臭を給水栓水で感知されることは、水道利用者からの苦情を招き、ひいては水道に対する信頼性を低下させることにつながるという認識がある。トリハロメタンや農薬類が水道水から検出されることもあ

り、オゾン、活性炭、軟水処理、精密・限外濾過膜、NF濾過膜と浄水処理におけるレダグンデンシーを増し、さらには給配水システムの有効率を高めるとともに水質劣化を少なくする資機材を用いるなどして管理技術を高めつつある。当然のことながら、塩素の使用を行わないか、塩素臭を感知しない水道水を供給する水道が多くなっている。その結果として、水道水の信頼性が回復し、テーブルウォーターとして水道水が使われるようになってきているのである。

わが国にあっても、公衆衛生の向上を目指した水道から、全ての社会活動に必要な水を供給しつつ、国民が安心して水道水を利用できるシステムを構築しなければならない。これまでの集中型の水道システムに、分散型のシステムを共存させて、健全な水循環・水代謝システムへと発展していかなければならないと考える。

なお、本稿は学術会議水資源専門委員会、水文・水資源学会、国土交通省主催水資源学シンポジウム(平成16年3月)で発表したものである。

参考文献

- 1) 丹保憲仁、丸山俊朗編：「水大循環と地域水代謝」、眞柄泰基執筆 第8章都市活動と水資源、技報堂出版、2003。
- 2) 高橋裕編：「首都圏の水—その将来を考える」、眞柄泰基執筆 4 首都圏の水環境の現状はどうか、東京大学出版会、1993。
- 3) 厚生労働省：「水道統計(平成13年度)」、(社)日本水道協会、2003。
- 4) 鈴木基之：「環境工学(放送大学大学院教材)」、鈴木基之、眞柄泰基執筆 4 処理技術概論(1)上水処理、日本放送出版協会、2003。
- 5) 健全な水循環系構築に関する関係省庁連絡会議：「健全な水循環系構築のための計画作りに向けて」、2003。
- 6) 厚生労働省：水質基準の見直し等について、2003。

(2004.3.3 受付)